

TNO PUBLIEK

Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK Den Haag
Postbus 96864
2509 JG Den Haag

TNO-rapport

www.tno.nl

TNO 2019 R10725 | Eindrapport

T +31 88 866 10 00
F +31 70 328 09 61

Monitor Draadloze Technologie

Voorjaar 2019



Datum	juni 2019
Auteur(s)	Ir. S. Braam, Ir. A.H. van den Ende, Dr. L. Jorgueski, Ir. R. Overduin, Dr. Ir. M.J.M. van Sambeek
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	42 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	Monitor Draadloze Technologie 2019
Projectnummer	060.37528

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2019 TNO

TNO PUBLIEK

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	De Monitor Draadloze Technologie	3
1.2	Het 'draadloos speelveld'	3
2	Ontwikkelingen in draadloze technologie.....	5
2.1	Wi-Fi.....	5
2.2	Low Power WAN's.....	14
2.3	Geavanceerde antennesystemen in 5G-netwerken	25
2.4	Sharing by slicing.....	32
2.5	Machine learning en draadloze communicatie	36
3	Tot besluit.....	42

1 Inleiding

Om overzicht te bieden in het speelveld van de diverse draadloze technologieën, stelt TNO sinds een aantal jaren een Monitor Draadloze Technologie samen. Hierin worden ontwikkelingen in de technologie en de markt gevolgd.

In dit inleidende hoofdstuk worden de scope en de opzet van de Monitor Draadloze Technologie behandeld.

1.1 De Monitor Draadloze Technologie

Met de Monitor Draadloze Technologie wil TNO een degelijk, actueel en toegankelijk overzicht bieden van de stand van zaken ten aanzien van de ontwikkeling en inzet van draadloze technologie. De Monitor Draadloze Technologie tracht verschillende doelgroepen te bedienen bij overheid en bedrijfsleven in Nederland. Dit betekent dat de monitor erop gericht is om informatief te zijn voor lezers met een algemene achtergrond in de telecommunicatie. In principe worden wereldwijde ontwikkelingen gevolgd, vanuit een nationaal perspectief.

Evenals vorige jaren is gekozen voor de schriftelijke rapportagevorm om de informatie te ontsluiten. Deze bestaat uit twee (halfjaarlijkse) edities, zodat beter kan worden aangesloten op recente trends en ontwikkelingen:

- Een overzicht van ontwikkelingen vanuit technologisch perspectief. Per technologie wordt kort de stand van zaken beschreven. Dit wordt gedaan in de voorjaarseditie, die nu voor u ligt;
- Een editie die met name gaat over een aantal toepassingen van draadloze communicatietechnologie. Dit is de zogenaamde najaarseditie.

TNO hecht eraan te benadrukken dat de Monitor Draadloze Technologie slechts een momentopname is van een complex en snel veranderend speelveld. Het is daarom mogelijk dat opgenomen informatie op het moment van lezen niet meer up-to-date is, of niet langer relevant. Daarnaast valt niet te ontkomen aan enige willekeur in de keuze van geschetste ontwikkelingen. Het kan dus zijn dat ontwikkelingen die in de ogen van de lezer zeer relevant zijn, niet worden beschreven. TNO staat open voor suggesties of aanbevelingen voor verdere verbeteringen.

1.2 Het 'draadloos speelveld'

Met de explosief stijgende groei in mobiel dataverkeer krijgen ook ontwikkelingen die hieraan tegemoet willen komen, steeds verder vorm. Door mobiele providers wordt fors geïnvesteerd in de capaciteitsuitbreiding van hun 4G (LTE)-netwerk. Via LTE-Advanced (4,5G) wordt voorgesorteerd op de verwachte komst van 5G.

Met de opkomst van 5G dient zich een nieuw telecommunicatieparadigma aan. Hierbij wordt niet alleen wezenlijke vergroting van datacapaciteit en *quality-of-service* gerealiseerd maar voorziet tevens de zogenaamde *slicing*-techniek in het onderling geïsoleerd en gelijktijdig bedienen van verschillende gebruikersgroepen. Hierdoor maken zowel consumenten als professionele gebruikersgroepen gebruik van dezelfde infrastructuur. Dit gedeeld gebruik van netwerkcapaciteit door

meerdere gebruikersgroepen is een heel andere benadering dan bijvoorbeeld spectrumflexibilisering. In principe kunnen de twee technologieën dan ook gecombineerd toegepast worden. Slicing wordt in deze monitor in samenhang met draadloze communicatie behandeld in Paragraaf 2.4.

Niettemin blijft de realisatie van veel capaciteit per gebruiker en het bedienen van meerdere gelijktijdige 'grootgebruikers' per oppervlakte een van de belangrijke ambities in 5G. Daarvoor is vooral voor de millimetergolf-frequenties (boven 6 GHz) het gebruik van geavanceerde antennesystemen (zogenaamde *smart antennas*) noodzakelijk. In deze monitoreditie wordt in Paragraaf 2.3 toegelicht wat *smart antennas* behelst en wat recente ontwikkelingen en verwachtingen zijn.

Naast cellulaire mobiele netwerken hebben Wi-Fi (Wireless Fidelity) en andere draadloze technologieën voor lokaal gebruik een belangrijke plaats ingenomen bij het laagdrempelig aanbieden van draadloze toegang over kortere afstanden. Daarbij nemen de toepassingsmogelijkheden van met name Wi-Fi als drager van een grotere diversiteit aan diensten gestaag toe. In deze voorjaarsmonitor wordt dan ook in Paragraaf 2.1 aandacht besteed aan de ontwikkelingen sinds de laatste drie jaar.

Naast het aanbieden van een grote capaciteit is het echter ook van groot belang dat wordt voorzien in adequate, veelal geautomatiseerde communicatie tussen apparaten onderling, ofwel *Internet-of-Things* (IoT). Hier spelen vooral eisen als betrouwbaarheid, tijdigheid en over het algemeen ook het overbruggen van aanzienlijke afstanden een rol. In deze voorjaarseditie komen in Paragraaf 2.2 specifieke landelijk dekkende oplossingen voor IoT ter sprake die zijn gebaseerd op Low Power Wide Area Network (LP-WAN)-technologieën zoals LoRa, SigFox maar ook in cellulaire netwerken geïntegreerde oplossingen.

De opkomst van IoT loopt min of meer parallel met die van *artificial intelligence* en met name van *machine learning*, de technologie die computers in staat stelt hun methoden autonoom te verbeteren. Hiervoor is het nodig dat de computer continue veel data aangeboden krijgt waardoor deze verbanden kan leggen. Daartoe bieden IoT-netwerken de verbindingen tussen deze computer en andere apparatuur (zoals andere computers en sensoren). Men kan zich echter afvragen of machine learning ook ingezet kan worden om draadloze communicatie te verbeteren, bijvoorbeeld door een radio te 'leren' hoe omgegaan moet worden met complexe communicatiekanalen om hiervan zo goed mogelijk gebruik te maken en zo goed en veel mogelijk data overgebracht te krijgen. Dit onderwerp komt in Paragraaf 2.5 aan bod.

2 Ontwikkelingen in draadloze technologie

2.1 Wi-Fi

2.1.1 *Introductie*

Wi-Fi is al meer dan 20 jaar één van de meest succesvolle draadloze technieken. In 2018 zijn er wereldwijd bijna 3 miljard Wi-Fi producten verkocht en de totale *installed base* van apparaten met Wi-Fi technologie bedroeg eind 2018 bijna 9,5 miljard. Iedere nieuwe laptop, smartphone, tablet of Smart TV is voorzien van Wi-Fi technologie om verbinding te maken met een Wi-Fi-netwerk of met een ander apparaat via directe communicatie.

In de voorjaarseditie van de Monitor Draadloze Technologie 2017 zijn de ontwikkelingen rondom Wi-Fi ook beschreven. In deze paragraaf is hiervan een update gegeven.

Wi-Fi wordt als technologie op veel verschillende manieren ingezet in producten en diensten:

- Wi-Fi voor consumenten: internet toegang via Wi-Fi voor consumenten thuis, inclusief besparing op bekabeling in huis;
- Wi-Fi voor bedrijven: Wi-Fi-netwerken op kantoorlocaties, waarbij tevens besparing op bekabeling plaatsvindt;
- Publieke Wi-Fi *hotspot*: zowel gratis als betaalde toegang tot internet via Wi-Fi voor consumenten op publieke en semi-publieke locaties zoals hotels, restaurants, vliegvelden, stadions, scholen en universiteiten. Hierbij kunnen mobiele operators ook zelf actief sturen op gebruik van Wi-Fi-netwerken in plaats van mobiele netwerken op drukke (indoor) locaties of op thuislocaties. Dit mechanisme wordt aangeduid met *off-loading* (zie ook Paragraaf 2.1.2.2);
- Wi-Fi-apparatuur en -componenten voor directe communicatie: naast Wi-Fi producten voor communicatie via een Wi-Fi access point, verschijnen er ook meer en meer producten die directe communicatie tussen randapparatuur mogelijk maken voor bijvoorbeeld media streaming, gebaseerd op Wi-Fi Direct, WiGig en/of Miracast.

Deze Wi-Fi producten en -oplossingen bieden indirect belangrijke toegevoegde waarde voor consumenten en bedrijven. Dit kan ook worden uitgedrukt in een directe economische waarde. In een studie in opdracht van de Wi-Fi Alliance¹ is onderzocht wat de economische waarde van Wi-Fi is: de wereldwijde waarde wordt geschat op ca. \$2 biljoen in 2018 met een groei naar \$3,5 biljoen in 2023. Deze studie toont de grote economische waarde van Wi-Fi aan en tevens indirect het belang om ook in de toekomst voldoende licentie-vrij spectrum beschikbaar te hebben om de groei van Wi-Fi gebruik te blijven ondersteunen.

¹ Bron: "The economic value of Wi-Fi: a global view (2018 and 2023)", Telecom Advisory Services, Oktober 2018



Figuur 1: Gebruik van een Wi-Fi hotspot op een horeca-locatie²

2.1.2 *Ontwikkelingen Wi-Fi diensten in Nederland en Europa*

In deze paragraaf zijn specifieke ontwikkelingen rondom Wi-Fi in Nederland en Europa beschreven.

2.1.2.1 *Eduroam en Govroam*

Eduroam (*education roaming*)³ maakt het voor leerlingen, studenten, onderzoekers en medewerkers in Nederland mogelijk om op een veilige manier gebruik te maken van het draadloze Wi-Fi-netwerk van hun onderwijs- of onderzoeksinstelling. Zij kunnen daarnaast met hun eigen inloggegevens probleemloos gebruik maken van het Eduroam-netwerk bij andere onderwijs- of onderzoeksinstellingen in Nederland (momenteel op 1.500 locaties) en wereldwijd op 26.000 locaties in 101 landen. Eduroam maakt dit mogelijk doordat de servers voor de authenticatie van gebruikers voor toegang tot Eduroam Wi-Fi-netwerken, onderling zijn verbonden.

Ditzelfde concept wordt ook gebruikt door Govroam (*Government roaming*)⁴ dat medewerkers in de publieke sector veilig toegang geeft tot Wi-Fi-netwerken op alle deelnemende overheidslocaties.

2.1.2.2 *Wi-Fi als aanvulling op mobiele netwerken in Nederland*

Consumenten maken ook buitenshuis in toenemende mate gebruik van gratis Wi-Fi-netwerken, zoals in cafés, restaurants, vliegvelden, stadions en winkelcentra en in zogeheten *home spots* van bijvoorbeeld KPN en Ziggo waarbij een tweede Wi-Fi 'gastnetwerk' mogelijk wordt op breedband kabel- of DSL-modems. Naast deze Wi-Fi hotspots van de mobiele operators zelf zijn er op grotere publieke locaties zoals vliegvelden, stadions, et cetera zogeheten Wi-Fi-gebaseerde Internet Service Providers met eigen Wi-Fi-netwerken.

² Bron: www.wifiwijs.nl/hotspot/

³ www.eduroam.nl

⁴ www.govroam.nl

In het recente verleden was het de consument zelf die koos voor internet-toegang via Wi-Fi om te besparen op kosten, met name op hoge roaming-kosten in het buitenland. Door de sterke daling van de prijs van mobiele data, de grotere databundels (zelfs 'onbeperkt') in abonnementen en de Europese wetgeving rondom EU roaming is er een verschuiving zichtbaar waarbij het juist de mobiele operator is die verkeer naar Wi-Fi-netwerken wil sturen, met name voor thuisgebruik. Hiermee kan de mobiele operator namelijk investeringen in mobiele netwerken om extra capaciteit te bieden, uitstellen. Eveneens zorgt deze *off-loading* voor een toename van de gemiddelde internetsnelheid op mobiele netwerken doordat congestie wordt voorkomen.

Het gebruik van Wi-Fi hotspots heeft een duidelijke positie in de netwerkstrategieën van mobiele operators. Al een aantal jaren is Wi-Fi voor mobiele operators in beeld als een belangrijke manier om via Wi-Fi *offload* de verkeerslast op hun cellulaire netwerk te verminderen. Mobiele operators zien Wi-Fi als aanvulling op hun mobiele netwerk: dataverkeer wordt - naast Wi-Fi thuisnetwerken – afgehandeld via Wi-Fi hotspot-netwerken van (gelieerde) operators. Zowel KPN (via 'KPN WiFi' en 'KPN Hotspots') als Ziggo (via Ziggo 'WiFiSpots') kiezen momenteel voor een grootschalige inzet van Wi-Fi binnen hun diensten middels hun 'hotspot-aanpak' via 'home spots' en publieke Wi-Fi hotspots met meer dan 1-2 miljoen installatiepunten in Nederland.

Daarnaast heeft Ziggo de strategie om dekking te bieden in stedelijke gebieden via publieke hotspots. Dit vindt plaats door straatkasten te voorzien van Wi-Fi *access points* (APs) als aanvullende 'WiFiSpots'. Deze APs werken in de 5 GHz-band en hebben een bereik van 50-100 m.

2.1.2.3 *Wi-Fi bellen in Nederland*

Bellen over Internet (ook VoIP of *Voice-over-IP* genoemd) via apps zoals Skype, Viber, Facebook Messenger, Apple Facetime audio en WhatsApp is al langere tijd mogelijk over mobiele netwerken en via Wi-Fi-netwerken. De kwaliteit en betrouwbaarheid op 'onbeheerde' Wi-Fi-netwerken werd door mobiele operators lange tijd als onvoldoende gezien. Sinds de aankondiging van Apple in Juli 2014 over ondersteuning van *Wi-Fi Calling* in iOS8 en het gebruik hiervan door T-Mobile US is echter een verschuiving zichtbaar bij mobiele operators. In de VS bieden de vier grote mobiele operators de mogelijkheid tot het gebruik van *Wi-Fi Calling*.

Wi-Fi Calling – ofwel 'Wi-Fi bellen' is een technologie die de mogelijkheid biedt om vanuit de gewone telefoniefunctie op een smartphone ook via Wi-Fi-netwerken te bellen en niet via een aparte app. 'Wi-Fi bellen' wordt steeds meer gezien als een nuttige technologie om de kwaliteit van telefonie te verbeteren, met name waar de mobiele netwerkdekking slecht of beperkt is zoals in bedrijfspanden, hoogbouw, of op zogeheten 'non-spots' in een mobiel netwerk.

Ook in Europa zijn er steeds meer voorbeelden van operators die deze functie bieden. Deze is vaak gekoppeld aan de dienst '4G bellen' ofwel VoLTE (*Voice-over-LTE*) waarbij telefonie over een LTE (4G) datanetwerk geleverd wordt. Sinds eind 2018 bieden in Nederland ook alle mobiele providers bellen via Wi-Fi in de 5 GHz-band aan als aanvulling op '4G bellen', met name om de indoordekking te verbeteren.

Wi-Fi bellen naar het alarmnummer 112 is nog niet mogelijk, hierbij wordt teruggeschakeld naar het mobiele netwerk. Dit komt omdat mobiele operators wettelijk verplicht zijn bij een 112-oproep de locatie uit het mobiele netwerk (zendmast) door te geven. In de nabije toekomst zal dit mogelijk veranderen omdat de nieuwe Europese telecom wetgeving het gebruik van Advanced Mobile Location (AML) toestaat waardoor bij 112-oproepen locatie-informatie uit een smartphone zelf meegestuurd wordt. De locatie-bepaling gebeurt hoofdzakelijk bij respectievelijk indoor- en outdoor-gebruik via gedetecteerde Wi-Fi-netwerken en satelliet-navigatie (via GPS en Galileo).

2.1.3 Ontwikkelingen rond Wi-Fi en mobiele netwerken

2.1.3.1 LTE en 5G in de licentievrije 5 GHz-band

Door de sterke groei van mobiel dataverkeer met ca. 30% per jaar zijn vanuit de mobiele industrie ook oplossingen ontwikkeld om LTE te kunnen gebruiken in de licentievrije 5 GHz-band en om Wi-Fi-netwerken te combineren met 4G- en 5G-netwerken. In de VS is de variant LTE-U (*LTE in Unlicensed Spectrum*) ontwikkeld door het industrieconsortium LTE-U Forum. De eerste producten zijn begin 2017 vrijgegeven door de FCC, de spectrumregelgever in de VS.

De variant LTE-U is niet geschikt voor Europa, doordat LTE-U geen ondersteuning biedt voor de functie *Listen-Before-Talk* (LBT), waarmee een terminal kan bepalen of het kanaal vrij is voordat het zelf mag zenden. Dit is in Europa een voorwaarde voor gebruik van de 5 GHz-band. Voor de Europese markt is door 3GPP de oplossing *LTE-License Assisted Access* (LAA) ontwikkeld. Met LAA is gebruik van LTE in de 5 GHz-band mogelijk waarbij dataverkeer via licentie-gebonden en licentievrij spectrum wordt verstuurd. Binnen 3GPP zijn verbeteringen van LAA ontwikkeld in 3GPP Release 13 en hoger voor het gebruik van LAA in de down- en uplink. De 3GPP RAN4 groep heeft specificaties voor testen (3GPP TS 36.141) opgesteld voor LTE apparatuur ten aanzien van *Listen-Before-Talk* (LBT). Deze groep werkt ook aan specificaties voor testen bij gebruik van meerdere LTE en Wi-Fi apparaten in dezelfde 5 GHz-band.

In januari 2019 meldde de Global mobile Suppliers Association (GSA) dat 32 mobiele operators in 21 landen plannen hebben om te investeren in LTE-LAA. Hiervan hebben zes operators reeds de lancering van netwerken met LTE-LAA aangekondigd in vijf landen (exclusief Nederland), terwijl de overige 26 operators bezig zijn met testen of uitrol van de technologie in 17 landen. De GSA identificeerde ook 20 chipsets met modems van verschillende leveranciers waaronder GCT, Intel, Mediatek, Qualcomm en Samsung die een of meer *spectrum sharing* technieken ondersteunen. Naast LTE-U en LTE-LAA betreft dit ook LWA (*LTE-WLAN aggregation*), zie Paragraaf 2.1.3.2.

Daarnaast heeft het industrie-consortium MulteFire Alliance een oplossing ontwikkeld die het mogelijk maakt om LTE-technologie te gebruiken in de 5 GHz-band zonder gebruik via licentie-gebonden spectrum (voor controle en signalering) van mobiele operators zoals bij LAA en LWA het geval is.

MulteFire-oplossingen zijn momenteel beschikbaar voor private netwerken. Het gebruik van LTE in de 5 GHz-band staat momenteel niet alleen vanuit de markt sterk in de belangstelling maar ook vanuit regelgevers die willen voorkomen dat LTE geen negatief effect heeft op de datasnelheid van Wi-Fi. Voor Wi-Fi en LTE-U

zijn hiervoor in 2016 specificaties voor testen opgesteld, die gebruikt is voor de LTE-U producten die in de VS zijn vrijgegeven. Voor LTE-LAA (de variant voor o.a. Europa) zullen deze door 3GPP worden opgesteld. Er is een recente aanwijzing dat ook operators in Nederland in LTE-LAA en mogelijk MulteFire investeren⁵.

2.1.3.2 *Aggregatie van LTE- en Wi-Fi-verkeer*

LTE-WLAN aggregation (LWA) biedt ondersteuning voor 'aggregatie' van dataverkeer van Wi-Fi-netwerken en van het LTE-radionetwerk in de mobiele zendmast. Met LWA kan dataverkeer gespreid worden verstuurd over LTE- en Wi-Fi-netwerken, in eerste versie alleen via downlink.

LWA is gestandaardiseerd door 3GPP in Release 13 en hoger. LWA in 3GPP Release 13 biedt ondersteuning voor Wi-Fi in 2,4 en 5 GHz-banden. Release 14 biedt via *Enhanced LWA* (eLWA) ook ondersteuning voor de 60 GHz-band (802.11ad en 802.11ay met de merknaam WiGig, zie verder Paragraaf 2.1.6) en aggregatie van verkeer in de uplink. LWA vereist wel aanpassingen in het Wi-Fi-netwerk om een koppeling tussen het Wi-Fi-netwerk en het mobiele netwerk mogelijk te maken. Deze oplossing lijkt daarom alleen bruikbaar voor grootschalige Wi-Fi-netwerken die door een (mobiele) operator worden geleverd.

2.1.3.3 *5G en Wi-Fi*

Binnen 5G is de strategie gericht op ondersteuning van meerdere, complementaire radiotechnologieën (*multi RAT- Radio Access Technologies*), omdat de voorspelde explosieve groei van dataverkeer (met name video) in de komende jaren onmogelijk afgehandeld kan worden door 5G mobiele netwerken met beperkte capaciteit in vooral de licentie-gebonden spectrumbanden in 700 MHz en 3,5 GHz. Wi-Fi is hierbij een belangrijke technologie. De 26 GHz-band is ook beschikbaar maar het is denkbaar dat de investering door operators in apparatuur op deze frequentie zal afhangen van of 3,5 GHz voor *small cells* voldoende blijkt.

In 3GPP Release 16 zal ondersteuning van 5G New Radio in licentie-vrije banden mogelijk worden, volledig los van gebruik van het mobiele netwerk werkend in licentie-gebonden spectrum. Hiermee kan 5G-technologie in private netwerken worden gebruikt, bijvoorbeeld in de fabriek van de toekomst om productielijnen en robots via 5G-technologie aan te sturen (zie voor 'Smart Industry en 5G' Paragraaf 3.1 van de najaarseditie van de Monitor Draadloze technologie 2017 en Paragraaf 5.3 van de najaarseditie van 2018).

2.1.4 *Ontwikkelingen in Wi-Fi producten*

De merknaam Wi-Fi, inclusief het bijbehorende beeldlogo, is formeel een merknaam van de WFA (*Wi-Fi Alliance*)⁶, een industrieconsortium dat in 1999 is opgericht en dit jaar dus 20 jaar bestaat. WFA is de organisatie die zorgt voor certificering van Wi-Fi producten onder het zogeheten Wi-Fi CERTIFIED programma. Producten die de Wi-Fi merknaam en/of het logo voeren zijn goedgekeurd door de WFA. Momenteel heeft WFA meer dan 45.000 producten gecertificeerd.

⁵ 190522-GSA-Snapshot-LTE-in-unlicensed-spectrum-April-2019

⁶ www.wi-fi.org

De specificaties voor certificering door WFA zijn gebaseerd op de IEEE 802.11-standaard. Naast Wi-Fi heeft de WFA ook andere merknamen geregistreerd, waaronder *Wi-Fi Direct*, *Wi-Fi Multimedia (WMM)*, *Miracast*, *Wifi Protected Setup (WPS)*, *Wi-Fi Protected Access (WPA, WPA2, WPA3)*, *WiGig*, *Wi-Fi Aware*, *Passpoint* en *Wi-Fi HaLow*.

De belangrijkste ontwikkelingen rondom nieuwe certificering van Wi-Fi in de afgelopen twee jaar zijn:

Wi-Fi 6

WFA heeft de naamstructuur van Wi-Fi producten aangepast zodat het voor consumenten duidelijker is welke “generatie(s)” Wi-Fi een product ondersteunt: Wi-Fi 6 zal worden gebruikt voor 6^e generatie Wi-Fi producten die de nieuwste 802.11ax technologie ondersteunen. Deze aanpassing is ook gedaan om richting consumenten Wi-Fi beter te positioneren, vergelijkbaar met mobiele 4G en 5G-producten. De eerdere generaties 1 t/m 5 zijn respectievelijk: 802.11a, 802.11b, 802.g (Wi-Fi 3), 802.11n en 802.11ac. De eerste gecertificeerde Wi-Fi 6 producten worden in het najaar van 2019 verwacht. De 802.11n en 802.11ac worden respectievelijk hernoemd naar Wi-Fi 4 en Wi-Fi 5.

Wi-Fi Location

In december 2018 is certificering voor indoor locatiebepaling op basis van Wi-Fi toegevoegd. Het toestel zelf kan dan op basis van verkregen informatie van Wi-Fi access points bepalen waar het zich bevindt.

Wi-Fi WPA3 en Wi-Fi Enhanced Open

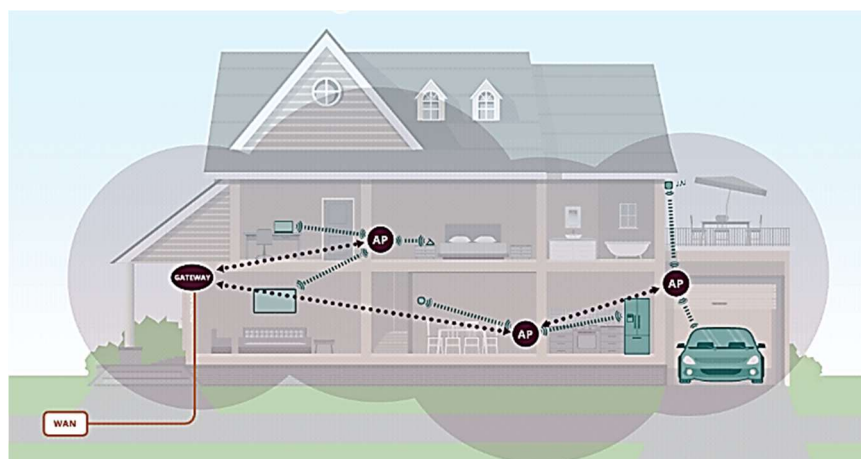
In juni 2018 is certificering voor *Wi-Fi Protected Access* versie 3 (WPA3) mogelijk. WPA3 is de opvolger van WPA2 met verbeteringen in de beveiliging van Wi-Fi-netwerken. De belangrijkste update is het vervangen van PSK (*Pre-Shared Key*) door SAE (*Simultaneous Authentication of Equals*) waardoor het netwerk beschermd is tegen *Key Reinstallation Attacks* (KRACK). *Wi-Fi Enhanced Open* verbetert data encryptie bij gebruik in open Wi-Fi-netwerken.

Wi-Fi Easy Connect

Hiermee is het mogelijk om QR-codes op een nieuw apparaat te scannen via een smartphone die al is verbonden met een Wi-Fi *access point*. Dit is met name handig om IoT (Internet-of-Things) apparaten eenvoudig aan een Wi-Fi-netwerk toe te voegen. Apparaten hebben unieke QR-codes en de code van elk apparaat functioneert als een soort openbare sleutel. Als men een apparaat wil toevoegen, scant men de code met een smartphone die al op het netwerk is aangesloten. Na het scannen van een QR-code, wisselen het netwerk en het apparaat sleutels uit voor de volgende verbindingen.

Wi-Fi EasyMesh

Wi-Fi EasyMesh netwerken gebruiken meerdere Wi-Fi toegangspunten die onderling via Wi-Fi zijn verbonden en samenwerken om één netwerk te vormen om het bereik van Wi-Fi in het hele huis en in de buitenruimte te verbeteren. Verschillende Wi-Fi mesh systemen zijn momenteel al beschikbaar via leveranciers zoals Netgear, Linksys, TP-Link en Google. *Wi-Fi EasyMesh* is bedoeld om producten van verschillende leveranciers te kunnen gebruiken in hetzelfde *mesh* netwerk. Certificering wordt door WFA sinds mei 2018 ondersteund.



Figuur 2: Bereikverbetering in en om het huis met Wi-Fi EasyMesh⁷

WFA is ook actief in de promotie van Wi-Fi als technologie en is met name in de VS actief in lobby's om licentie-vrij spectrum voor Wi-Fi uit te bereiden, te beschermen en om beperkingen in gebruik op te heffen.

2.1.5 *Wireless Broadband Alliance*

Naast de Wi-Fi Alliance is de Wireless Broadband Alliance (WBA)⁸ een tweede, relevante organisatie gericht op interoperabiliteit. WBA is opgericht door verschillende partijen uit de Wi-Fi industrie om de interoperabiliteit tussen Wi-Fi-netwerken van operators te bevorderen en de integratie met mobiele netwerken voor *off-loading* en hierbij te zorgen voor een uitstekende gebruikerservaring.

WBA is hoofdzakelijk actief in promotie en certificering van hoogwaardige Wi-Fi-netwerken (*carrier-grade*) via de *Next Generation Hotspot* (NGH) specificaties, waarmee een gebruiker direct toegang krijgt tot Wi-Fi-netwerken. Daarnaast is WBA actief in het opstellen van richtlijnen voor Wi-Fi-netwerken in steden (voor *Connected Cities*) en *in-home* Wi-Fi. Daarnaast produceert WBA white papers met uitleg over de opties voor integratie van Wi-Fi in 5G-netwerken en over uitbreiding van de huidige Wi-Fi roaming specificaties naar roaming via LoRa en MulteFire-netwerken (op basis van specificaties van LoRa Alliance en MulteFire Alliance).

2.1.6 *Toekomstige ontwikkelingen in Wi-Fi standaarden van IEEE 802.11*

Wi-Fi producten zijn gebaseerd op de IEEE 802.11-standaard. In 2016 is de derde revisie van de 802.11-standaard vrijgegeven: 802.11-2016. In iedere revisie worden alle nieuwe 'toevoegingen' (zoals 802.11ax) geïntegreerd. De vierde revisie van de 802.11-standaard wordt verwacht in 2020. De 802.11-standaard is nog steeds in ontwikkeling binnen IEEE.

Binnen IEEE 802.11 worden verschillende toevoegingen - met een eigen lettercombinatie - ontwikkeld in werkgroepen. Momenteel wordt gewerkt aan de volgende toevoegingen⁹:

- 802.11ax (*High Efficiency WLAN*): 802.11ax is de opvolger van 802.11ac en zal de efficiëntie van de WLAN-netwerken vergroten met als doel het

⁷ Bron: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-easymesh>

⁸ www.wballiance.com

⁹ Zie http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm voor de actuele status

- verhogen van de doorvoer van 802.11ac tot circa 4-10 Gbit/s. De IEEE-werkgroep voor 802.11ax is begonnen in maart 2014. De goedkeuring binnen IEEE staat gepland voor januari 2020. Het formele proces om tot een internationale standaard te komen duurt daarna nog typisch 6 maanden;
- 802.11ay (*Next Generation 60 GHz*): dit is een toevoeging die een nieuwe fysieke laag voor 802.11-netwerken definieert om te kunnen functioneren in het 60 GHz-spectrum. Dit zal een uitbreiding zijn van de bestaande 802.11ad. De overdrachtssnelheid van 802.11ay zal tenminste 20 Gbit/s zijn. De belangrijkste toevoegingen om dit te bereiken zijn technieken zoals *channel bonding* (van 2, 3 en 4 kanalen), MIMO en hogere modulatieschema's. De IEEE-werkgroep voor 802.11ay is begonnen in maart 2015 en de IEEE-goedkeuring is gepland voor maart 2020;
 - 802.11az (*Next Generation Positioning*): deze toevoeging is gericht op verbeterd gebruik van Wi-Fi voor indoor locatiebepaling op basis van Wi-Fi-netwerken. Wi-Fi-netwerken worden nu al gebruikt voor indoor locatiebepaling in smartphones. Deze werkgroep heeft tot doel om een nauwkeurigheid van beter dan 1 meter te behalen en wel bij efficiënt batterijgebruik en gebruik in drukke omgevingen zoals stadions. De werkgroep is in september 2015 gestart en de IEEE-goedkeuring staat gepland voor maart 2021;
 - 802.11ba (*Wake Up Radio*): deze toevoeging heeft tot doel een *wake up radio* te ontwikkelen om data op een meer energie-efficiënte manier te versturen. De bestaande Wi-Fi radio wordt geactiveerd door de aanvullende wake-up radio, die werkt bij maximaal 100 μ W. Daardoor verbruikt de bestaande Wi-Fi radio alleen energie bij het sturen of ontvangen van dataverkeer. De werkgroep is in december 2016 gestart en de IEEE-goedkeuring staat gepland voor juli 2020;
 - 802.11bb (*Visible Light Communication-VLC*): deze toevoeging is gericht op het gebruik van zichtbaar licht (golflengte tussen 380-5.000 nm) voor uplink en downlink communicatie met een minimale snelheid van 10 Mbit/s en minimaal één modus met een snelheid van 5 Gbit/s of hoger. Deze variant wordt ook wel aangeduid met de term Li-Fi (Light Fidelity). De werkgroep is in maart 2018 gestart en de IEEE-goedkeuring staat gepland voor juli 2021;
 - 802.11bc (*Enhanced Broadcast Service*): deze toevoeging is gericht op verbeteringen in broadcast verkeer, zowel binnen een netwerk met een Wi-Fi basisstation en Wi-Fi terminals (met authenticatie) als in een netwerk met alleen Wi-Fi terminals (zonder authenticatie). De toevoeging moet onder meer de identiteit van de zender afschermen bij het uitzenden van datapakketten via broadcast. Deze oplossing kan bijvoorbeeld in IoT-netwerken worden gebruikt voor het versturen van informatie tussen sensoren. De werkgroep is in december 2018 gestart en de IEEE-goedkeuring staat gepland voor januari 2022;
 - 802.11bd (*Enhancements for Next Generation V2X*): de toevoeging is gericht op verbeteringen in de 802.11p standaard. Deze Wi-Fi standaard is gebaseerd op 802.11a en wordt gebruikt voor ITS-toepassingen op basis van directe communicatie tussen voertuigen in de 5,9 GHz-band. De werkgroep is in december 2018 goedgekeurd en de IEEE-goedkeuring staat gepland voor juli 2021.

Verder is er binnen Wi-Fi Alliance en IEEE 802.11 aandacht voor de uitdagingen en oplossingen voor het simultaan gebruik van meerdere technologieën in de 5 GHz-band. Het werk is nu met name gericht op het gebruik van LTE-producten die werken in de licentievrije 5 GHz-band (zoals *LTE-License Assisted Access*) naast Wi-Fi. De nadruk ligt op het vastleggen van aanvullende voorwaarden om een 'eerlijk' gebruik van de band te garanderen waardoor deze producten elkaar niet verstoren of 'wegdrukken'.

2.1.7 *Andere toepassingen van Wi-Fi*

Naast het gebruik van Wi-Fi als draadloze technologie voor internet toegang zijn er specifieke gebieden waarin Wi-Fi wordt toegepast, zoals IoT en C-ITS.

Wi-Fi HaLow voor Internet-of-Things (IoT)

Voor IoT-toepassingen wordt gebruik gemaakt van zogeheten Low Power Wide Area Networks (LPWAN), zoals LoRa en SigFox. De IEEE 802.11ah-standaard met de bijbehorende merknaam Wi-Fi HaLow (uit te spreken als 'Hay-Low') is de Wi-Fi variant voor LPWAN en kan voor bepaalde toepassingen worden gezien als een alternatief voor LoRa, SigFox of LTE-oplossingen voor IoT-netwerken zoals Narrow-Band IoT (NB-IoT) en LTE-M. Omdat HaLow bedoeld is om te functioneren in de 900 MHz-band zijn ondanks het lage zendvermogen afstanden haalbaar van bijna twee maal die van Wi-Fi in de hogere frequentiebanden¹⁰. De eerste 802.11ah-producten van Newracom en Orca zijn al in 2016 op de markt verschenen. Een verkennende studie binnen IEEE 802.11 voor een opvolger van 802.11ah is beëindigd. Deze wordt niet vervolgd in een 802.11-werkgroep door gebrek aan consensus over het doel. Momenteel zijn er nog geen grootschalige toepassingen van Wi-Fi HaLow in producten.

Wi-Fi voor Coöperatieve Intelligente Transport Systemen (C-ITS)

inmiddels wordt ruim 15 jaar gewerkt aan C-ITS oplossingen met draadloze communicatie tussen (zelfrijdende) voertuigen onderling en tussen voertuigen en systemen aan de kant van de weg zoals verkeerslichten of matrixborden boven snelwegen, om de veiligheid en doorstroming op de weg te vergroten. Met behulp van draadloze uitwisseling van informatie kunnen zelfrijdende auto's op kortere volgafstand rijden. De extra informatie voorziet in een aanvulling op de informatie van sensoren (radar, camera) in de auto's waardoor men ook verder kan 'kijken' naar auto's die niet direct zichtbaar zijn voor deze sensoren.

Op radioniveau wordt gebruik gemaakt van IEEE 802.11p, een uitgekledede variant van 802.11a waarbij de mechanismen voor authenticatie en beveiliging zijn weggehaald om via *direct radio broadcast* ad-hoc communicatie mogelijk te maken tussen voertuigen. In Europa is voor ITS momenteel 3 maal 10 MHz toegewezen in de 5,9 GHz-band. De Europese standaard hiervoor is ITS-G5 en is ontwikkeld door de ETSI ITS-werkgroep en een werkgroep binnen CEN/ISO. Op 13 maart 2019 heeft de Europese Commissie wetgeving aangenomen met de voorwaarden voor het gebruik van C-ITS systemen in voertuigen op basis van deze specifieke Wi-Fi variant¹¹ vanaf 31 december 2019. Dit moet ervoor zorgen dat C-ITS systemen van verschillende autofabrikanten met elkaar werken voor de uitwisseling van waarschuwingen voor gevaarlijke situaties.

¹⁰ <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow>

¹¹ EC besluit C(2019)1789

2.2 Low Power WAN's

2.2.1 *Introductie*

De term Low Power Wide Area Networks (LPWAN's) wordt gebruikt voor IoT (*Internet-of-Things*) technologieën zoals LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), Sigfox en cellulaire IoT-oplossingen zoals LTE NB-IoT (*Narrow Band IoT*) en LTE-M (*Long Term Evolution for Machines*). Deze oplossingen zijn ontwikkeld voor Internet-of-Things (IoT), ook wel aangeduid met Machine-to-Machine (M2M) -toepassingen. Hierbij kunnen relatief kleine IoT-apparaten gevoed door batterijen, elkaar bereiken via internet of via een lokaal draadloos sensornetwerk. LPWAN's kenmerken zich door een groot bereik (typisch 1 tot 5 km, tot zelfs 30-50 km onder specifieke omstandigheden) te combineren met een laag stroomverbruik door IoT nodes (tot 10 jaar op een of twee AA-batterijen). De bijbehorende datasnelheden zijn echter ook laag, typisch tussen 100 bit/s (Sigfox) en 100 kbit/s.

Meer dan 90% van de huidige IoT-apparaten wordt gebruikt in zogeheten Wireless Personal Area Networks (WPAN, bijvoorbeeld *smart watches* met Bluetooth) en Wireless Local Area Networks (WLAN). Dit laatste betreft *in-home* IoT-apparaten met Wi-Fi. De rest van de IoT-apparaten wordt ontsloten via LPWAN's en cellulaire netwerken. Deze laatste groep zal naar verwachting in de komende jaren sterker groeien.

In de komende vijf jaar is de verwachting dat het aantal verkochte IoT-apparaten voor gebruik in LPWAN-netwerken zal groeien van 37 miljoen in 2018 naar 1,2 miljard in 2023. Deze apparaten zullen worden toegepast in sectoren zoals industriële automatisering, logistiek en landbouw¹². De grootste groei wordt verwacht op het gebied van (i) *asset tracking* van goederen en lokalisatie van personen/kinderen en (huis)dieren, (ii) precisielandbouw, (iii) bewaking van apparatuur op afstand en (iv) oplossingen voor slimmer gebruik van water, bijvoorbeeld om lekkages op te sporen of verbeterde irrigatie in de landbouw.

Ook in *Smart Cities* zien we nieuwe toepassingen zoals het gebruik van LPWAN voor het ontsluiten van informatie uit 'slimme' meters, bij sensoren/actuatoren om 'slimme' straatverlichting aan te sturen (aan als er een voetganger/fietser/voertuig op de weg is, uit als er niemand is) of om de vullingsgraad van afvalcontainers te registreren. IoT-apparaten sturen hiervoor typisch enkele keren per uur, dag of week kleine berichten.

In eerdere versies van de Monitor Draadloze Technologie zijn de technologieën LoRa en Sigfox beschreven (voorjaar 2016) en 3GPP IoT-technologieën (voorjaar 2017). In deze editie is een update gegeven van deze technologieën en gebruik in LPWAN-netwerkdiensten. Ook komen toekomstige ontwikkelingen ter sprake zoals IoT-oplossingen in 5G.

2.2.2 *LPWAN-technologieën*

Bij LPWAN wordt onderscheid gemaakt tussen cellulaire en non-cellulaire IoT-technologieën.

Cellulaire IoT-technologieën zijn ontwikkeld door 3GPP en worden toegepast in

¹² <https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/>

mobiele netwerken om IoT- ofwel M2M-diensten te leveren. Voorbeelden van cellulaire technologieën die momenteel beschikbaar zijn in mobiele netwerken zijn GSM- en LTE-gebaseerde oplossingen. Dit zijn respectievelijk: GSM M2M, zoals GSM-GPRS en *Extended Coverage GSM for IoT* (EC-GSM-IoT) en voor LTE: LTE-M en LTE NB-IoT. Momenteel zijn in Nederland vooral deze beide LTE-gebaseerde technologieën de belangrijkste. In 5G worden deze IoT-oplossingen verder doorontwikkeld waarbij ondersteuning in 5G-radionetwerken wordt gerealiseerd.

De groep non-cellulaire IoT-technologieën kent veel verschillende varianten. LoRaWAN (van LoRa Alliance) en Sigfox zijn op dit moment de bekendste en meest gebruikte non-cellulaire oplossingen en zijn dan ook verreweg de belangrijkste non-cellulaire IoT-technologieën binnen Nederland.

Andere non-cellulaire LPWAN-oplossingen vinden geen of nog geen toepassing in Nederland. Dit betreft de volgende categorieën:

- IoT-oplossingen gebaseerd op standaarden: IEEE 802.11ah (merknaam Wi-Fi HaLow), ETSI's Low Throughput Networks (LTN) en IEEE 802.15.4k (Low Energy Critical Infrastructure Networks);
- Alternatieven ontwikkeld door specifieke industrieën, vergelijkbaar met de LoRa Alliance: Weightless SIG (Special Interest Group), DASH7 Alliance, Wi-SUN Alliance en uCIFI Alliance;
- Door bedrijven zelf ontwikkelde IoT-technologieën. Deze worden via partners aangeboden: Ingenu met de technologie Random Phase Media Access (RPMA) en bedrijven zoals Qowiso, Link Labs, WAVIoT (NB-Fi) en Telensa met verschillende Ultra Narrow Band (UNB)-oplossingen voor gebruik in de ISM-band.

Tenslotte zijn er enkele aanbieders van satelliet-gebaseerde LPWAN's, zoals Fleet, Lacuna, Hiber (met eigen spectrum en een gateway/grondstation in Nederland) en Inmarsat LoRaWAN. Deze LPWAN-vorm, al dan niet in combinatie met terrestrische toegang tot een satelliet gateway, is te beschouwen als non-cellulaire vorm. Deze kan bij uitstek gekozen worden wanneer behoefte bestaat aan connectiviteit tot over zeer lange afstanden waarbij dekking door terrestrische LPWAN's niet kan worden gegarandeerd (zoals op zee, in een woestijn et cetera), bijvoorbeeld voor wereldwijde tracking van objecten of voor uitwisseling van lokale sensorgegevens. Een concreet voorbeeld van deze laatste toepassingscategorie is het Nederlandse agtech-project ten behoeve van de stimulering van een efficiënte en effectieve wereldwijde agrarische industrie, waarvoor Fleet het satelliet IoT-LPWAN levert.

Bijkomend voordeel van satelliet-gebaseerde LPWAN's is dat er een globaal netwerk is waardoor men niet van lokale providers afhankelijk is.

Er zijn nog praktische uitdagingen zoals het beperkte aantal berichten per dag en de aanzienlijke vertragingen maar de prijs voor gebruikers daalt nog steeds en komt nu in de buurt van die van de terrestrische LPWAN's. Nadeel is dat voor een satelliet-LPWAN veranderingen aan protocollen en devices nodig zijn.

Standaardisatie of een industriële alliantie zijn nog niet actueel. Al met al is te verwachten dat de marktpositie van satelliet-LPWAN's in een paar jaar vergelijkbaar wordt met die van terrestrische LPWAN's.

2.2.3 Gebruik LPWAN wereldwijd en in Nederland

Gelet op het aantal nodes en netwerken zijn de volgende technologieën op dit moment wereldwijd leidend: LoRaWAN, Sigfox, RPMA en Weightless naast de cellulaire technologieën LTE NB-IoT, LTE-M en EC-GSM-IoT¹³.

2.2.3.1 Non-cellulaire LPWAN's

In Nederland bieden mobiele netwerkkoperators momenteel oplossingen voor de volgende non-cellulaire netwerkdiensten en/of oplossingen:

- 1) **LoRaWAN**: sinds 2016 biedt KPN IoT-diensten op zijn LoRaWAN-netwerk met landelijke dekking. Daarnaast kan LoRaWAN-apparatuur ook worden gebruikt in private netwerken en biedt The Things Network de mogelijkheid dat gebruikers hun LoRaWAN gateways openstellen voor derden. Hierdoor ontstaat een *community based*-netwerk met een groter bereik. Wereldwijd zijn er meer dan 100 LoRaWAN-operators met dekking in 100 landen¹⁴;
- 2) **Sigfox**: dit is een Frans bedrijf met partners in verschillende landen om Sigfox-diensten te verkopen. Aerea is sinds mei 2016 de aanbieder voor Sigfox in Nederland¹⁵. Sigfox is geschikt voor toepassingen met relatief weinig berichten van elk geringe omvang: maximaal 140 berichten per dag met hooguit 12 bytes per bericht.

Daarnaast zijn er buiten Nederland voorbeelden van andere non-cellulaire netwerkdiensten:

- 1) **Random Phase Multiple Access (RPMA)**: een RPMA-netwerk is in Nederland niet beschikbaar. Ingenu is gericht op de Amerikaanse markt en biedt zijn technologie aan als een *Platform-as-a-Service (PaaS)* en netwerkkoperators kunnen buiten de VS via licenties een RPMA-netwerk uitrollen. In dit concept worden alle RPMA-modules via lokale netwerken aangesloten op dit Ingenu platform als dienst. In Nederland is er geen operator met een licentie van Ingenu.
- 2) **Weightless**: ook deze technologie is in Nederland niet beschikbaar in een landelijk netwerk. De technologie zelf kan wel worden gebruikt in private netwerken, zoals voor LoRaWAN het geval is.

2.2.3.2 Cellulaire LPWAN's

De volgende cellulaire technologieën worden door de Nederlandse mobiele netwerkkoperators ondersteund:

- 1) **LTE NB-IoT**: T-Mobile kondigde in oktober 2016 als eerste mobiele operator in Nederland de beschikbaarheid aan van NB-IoT op zijn mobiele LTE-netwerk in vier grote steden en wel voor testen via een *Early Access Program*. In mei 2017 was het netwerk landelijk dekkend via de 900 MHz-band. Vanaf juni 2018 is de NB-IoT-dienst commercieel beschikbaar bij T-Mobile. Vodafone biedt ook NB-IoT; KPN biedt momenteel nog geen NB-IoT;
- 2) **LTE-M**: KPN biedt sinds maart 2018 LTE-M-diensten aan. De LTE-M-dienst heeft landelijke dekking mede door het gebruik van de lage 800 MHz spectrumband en het aanzienlijke aantal KPN mobiele masten¹⁶. Vodafone kondigde in juni 2018 aan LTE-M te bieden met een landelijk dekkend LTE-M

¹³ <https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/>

¹⁴ <https://lora-alliance.org/in-the-news/lora-alliance-passes-100-lorawan-network-operator-milestone-coverage-100-countries>

¹⁵ <http://www.aerea.nl/over-sigfox/>

¹⁶ <https://www.kpn.com/zakelijk/internet-of-things/lte-m.htm>

netwerk. T-Mobile is in juli 2018 gestart met testen via zijn *Early Access Program* op het T-Mobile LTE-M-netwerk in heel Nederland;

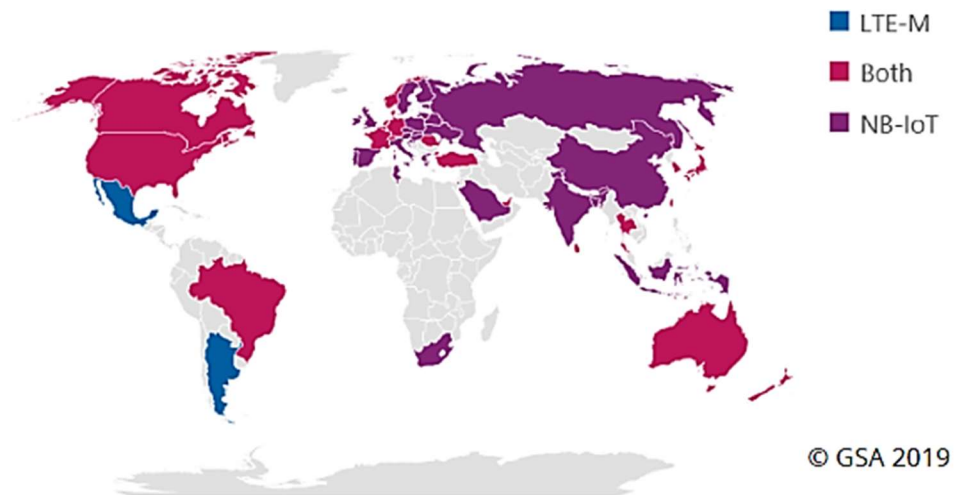
- 3) **GSM-M2M**: van deze 2G-gebaseerde oplossing wordt in Nederland alleen GSM-GPRS geleverd; EC-GSM-IoT is in Nederland niet beschikbaar.

In Frankrijk heeft Orange in 2017 een pilot uitgevoerd met LTE-M en EC-GSM-IoT om te onderzoeken of EC-GSM-IoT en LTE-M verbeteringen in dekking kunnen bieden¹⁷. In mei 2018 heeft Orange een LTE-M dienst in Frankrijk aangekondigd, om, naast LoRa, IoT-oplossingen voor klanten te bieden¹⁸.

Alle Nederlandse mobiele operators bieden potentiële gebruikers de mogelijkheid om met een *starters-kit* de gewenste IoT-oplossing te bouwen en te testen¹⁹.

Wereldwijd is er een brede ondersteuning van LTE-M en NB-IoT door MNO's, zoals door bijvoorbeeld GSA is gerapporteerd (zie ook Figuur 3):

- In 22 landen zijn zowel LTE-M als NB-IoT-netwerken in gebruik;
- 149 MNO's uit 69 verschillende landen overwegen investeringen in LTE-M of NB-IoT of beide.



Figuur 3: Overzicht landen waar LTE-M en/of NB-IoT is ondersteund door mobiele operators²⁰

2.2.3.3 Huidige LPWAN-oplossingen in Nederland

Onderling verschillen de LPWAN-technologieën op de volgende hoofdpunten:

1. Technische performance. Dit is met name datasnelheid en gebruik (berichtomvang en -frequentie). In mindere mate is dit bereik en dekking (bereik bij eigen netwerk, dekking bij landelijke netwerk dienst) en batterijgebruik. Dit laatste is sterk afhankelijk van de toepassing; veel dataverkeer betekent hoog batterijgebruik.

Het is erg lastig deze categorie te duiden voor specifieke LPWAN's, temeer omdat specificaties van leveranciers vaak geen juiste weergave zijn van wat in de praktijk haalbaar blijkt;

¹⁷ <https://www.gsma.com/iot/mobile-iot-pilots-operator/orange-2/>

¹⁸ <https://www.orange.com/en/Press-Room/press-releases/press-releases-2018/Orange-launches-LTE-M-network-in-France-and-confirms-further-LTE-M-network-launches-in-two-other-European-markets>

¹⁹ <https://www.kpn.com/zakelijk/internet-of-things/lte-m.htm>;

<https://iot.vodafone.nl/internet-of-things/iot-starter-kit>; <https://iot.t-mobile.nl/aan-de-slag/>

²⁰ bron: GSA "Global NB-IoT/LTE-M networks: March 2019", te downloaden via <https://gsacom.com/>

2. Gebruik in privaat netwerk, dus in eigen beheer, of alleen via een LPWAN-netwerkdienst. Dit is voor een belangrijk deel gekoppeld aan de radiofrequenties. In verband met het licentie-gebonden spectrum is cellulair IoT alleen mogelijk als LPWAN-netwerkdienst. Overig oplossingen kunnen in principe vrij worden gebruikt in (verschillende) licentie-vrije banden zoals 868 en 433 MHz;
3. Het eco-systeem van hardware-leveranciers. Oplossingen verschillen in het onderliggende zogenaamde eco-systeem van leveranciers. Dit betreft met name het aantal aanbieders van chipsets, LPWAN-modules en LPWAN-gateways/basisstations.

Onderstaand geeft Tabel 1 een overzicht van de voor Nederland vier belangrijkste LPWAN-oplossingen en hun meest onderscheidende kenmerken.

Tabel 1: Voor Nederland belangrijkste LPWAN-technologieën en hun kenmerken

Technologie	Data snelheid / typisch gebruik	Dienst of eigen netwerk	Eco-systeem: Aantal hardware module-leveranciers
LoRaWAN	Tot 50 kbit/s Laag gebruik: enkele berichten per uur	Beide: dienst door KPN in NL, eigen netwerk is ook mogelijk	Middelgroot
SigFox	Tot 300 bit/s Zeer laag: enkele berichten per dag	Dienst door Sigfox in EU	Klein
NB-IoT (cellulair)	Tot 250 kbit/s Laag: enkele berichten per uur	Dienst: Vodafone en T-Mobile in NL	Middelgroot
LTE-M (cellulair)	Tot 1 Mbit/s Middel: grotere berichten, ook geschikt voor spraak	Dienst: KPN, T-Mobile en Vodafone in NL	Laag tot middelgroot

2.2.4 Toekomstige ontwikkelingen

2.2.4.1 Innovaties hardware en sensoren voor IoT

De innovatie van sensoren en LPWAN-modules gaat door. Voorbeelden hiervan zijn *multi-radio asset trackers* voor de in de introductie genoemde *asset tracking*, universele sensoren en de verdere ontwikkeling naar kleinere en goedkopere (wegwerp) modules. Een voorbeeld van een universele sensor is het product van Polysense Technologies met 9 ingebouwde sensoren (voor vibratie, vochtigheid, temperatuur, geluid en lokalisatie) en aansluitingen voor externe sensoren gericht op gebruik in meerdere toepassingsgebieden²¹. Sigfox heeft een prototype van een goedkope RF-module (van \$0,20) aangekondigd²² voor gebruik met de Sigfox Admiral Ivory service voor *track & trace* van pakketten en enveloppen. Semtech heeft ook een LoRa-gebaseerde *nano-tag* ontwikkeld met *ultrathin printed battery* technologie van Imprint Energy en met een LoRa-communicatiemodule.

²¹ <https://www.semtech.com/company/press/polysense-introduces-universal-sensing-node-product-line-based-on-semtechs-lora-devices-and-wireless-rf-technology>

²² <https://www.itworld.com/article/3226476/sigfox-shows-20-cent-iot-wireless-module.html>

2.2.4.2 Lokalisatie in LPWAN's

Het volgen en lokaliseren van objecten, personen en dieren is het snelst groeiende LPWAN-toepassingsgebied met de grootste totale potentiële marktomvang. Modules kunnen zelf lokalisatie doen op basis van GPS en Galileo-satellieten. Dit kost echter extra stroom waardoor de periode van gebruik wezenlijk wordt beperkt of een batterij eerder moet worden vervangen. Daarom wordt in LPWAN-diensten ook lokalisatie vanuit het netwerk ondersteund, waarbij op basis van signalen op minimaal drie masten de locatie van een module kan worden bepaald. LoRaWAN-netwerken van onder andere KPN ondersteunen op radiosignaal gebaseerde geografische lokalisatie voor het volgen van mobiele apparatuur met een nauwkeurigheid tot typisch een straal van 100 meter. Hierbij is geen GPS benodigd. Daarnaast zien we ook voorbeelden van *multi-radio asset trackers* die voor nauwkeurige indoor real-time locatiesystemen (RTLS), LPWAN-technologieën zoals Sigfox, LoRaWAN of LTE NB-IoT voor *outdoor asset-tracking* combineren met kortbereik draadloze technologieën zoals Wi-Fi of Bluetooth Low Energy (BLE). In oktober 2018 lanceerde Sigfox de Atlas WiFi-dienst²³ gericht op de logistieke sector. De dienst combineert lokalisatie op basis van de Wi-Fi-infrastructuur die is geregistreerd in de *HERE Location Suite* met lokalisatie via Sigfox-netwerktechnologie. Ook hier wordt geen gebruik gemaakt van GPS.

2.2.4.3 Innovaties LoRa Alliance

In oktober 2018 heeft LoRa Alliance een drietal nieuwe specificaties gepubliceerd die firmware upgrades *over-the-air* (FUOTA) op een gestandaardiseerde manier mogelijk maken. Hierdoor wordt een module-update van firmware via het LoRaWAN mogelijk²⁴. Deze drie nieuwe specificaties zijn:

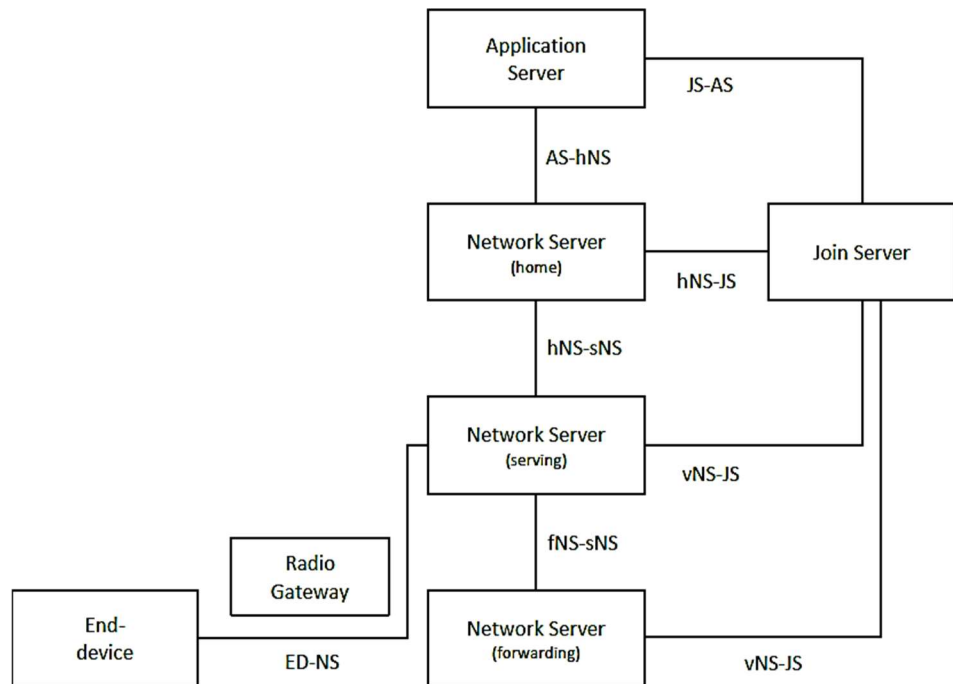
- LoRaWAN Application Layer Clock Synchronization Specification;
- LoRaWAN Remote Multicast Setup Specification;
- LoRaWAN Fragmented Data Block Transport Specification.

Roaming via publieke en private LoRaWAN's is impliciet mogelijk door het open communicatiemodel van LoRaWAN dat een splitsing kent tussen netwerk- en applicatieserver. In de specificatie *LoRaWAN Backend Interfaces*²⁵ is beschreven hoe roaming plaatsvindt van eindapparatuur tussen LoRaWAN's van verschillende aanbieders. Volledigheidshalve is voor de meer technisch georiënteerde lezer in Figuur 4 het daartoe aangepaste netwerkmodel aangegeven. Daarin is een extra element (*Join Server*) zichtbaar en extra verbindingen tussen Network Servers in het zogeheten thuisnetwerk (*home*) en in het roaming netwerk (*servicing en forwarding*).

²³ <https://www.sigfox.com/en/news/sigfox-introduces-atlas-wifi-its-geolocation-service-massive-iot>

²⁴ <https://lora-alliance.org/in-the-news/lora-alliancetm-enhances-lorawanm-protocol-new-specifications-support-firmware-updates>

²⁵ <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawanm-backend-interfaces-v1.0.pdf>



Figuur 4: LoRaWAN Network Reference Model (NRM) voor een roaming End-Device²⁶

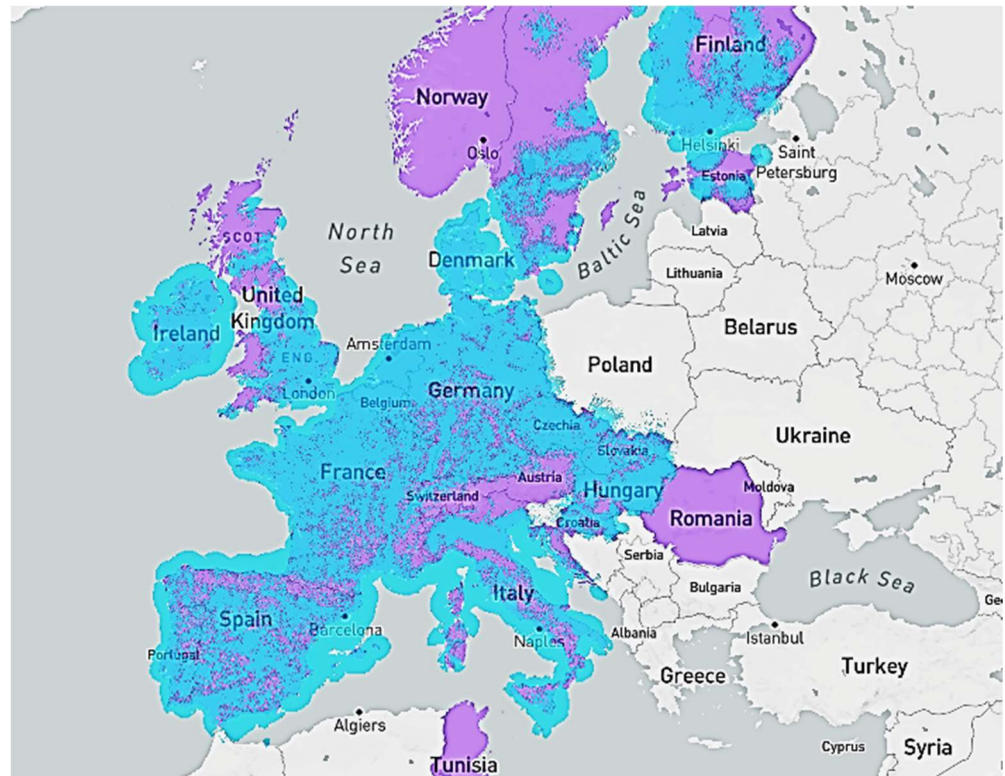
In de nabije toekomst zullen deze functies voor roaming en over-the-air firmware updates steeds meer beschikbaar komen in LoRaWAN-modules van leveranciers en in LoRaWAN's van operators.

Daarnaast is LoRa Alliance bezig met een update van specificaties. Dit betreft onder meer het toevoegen van functies voor accounting (het verrekenen van verbruik voor roaming) en een *relay* functie in LoRaWAN.

2.2.4.4 Innovaties Sigfox

Sigfox richt zich op het uitbreiden van de netwerkdekking in bestaande en nieuwe landen. Momenteel is er dekking in bijna 60 landen, waaronder in een groot deel van West-Europa. Dit betreft onder meer Nederland, Duitsland, België, Frankrijk, Spanje, Italië en Groot-Brittannië, zie Figuur 5. Aangezien Sigfox de enige aanbieder is van deze technologie op zijn netwerk is roaming impliciet geregeld op het Sigfox-netwerk.

²⁶ Bron: LoRaWAN Backend Interfaces 1.0, LoRa Alliance



Figuur 5: Dekking Sigfox-netwerken²⁷. Met paars zijn gebieden aangegeven waar uitrol plaatsvindt, met blauw locaties waar nu dekking is

2.2.4.5 3GPP-standaardisatie: 5G en IoT

De verbeteringen van NB-IoT en LTE-M voor 5G zijn aangegeven in de 3GPP specificaties voor Release 15, 16 en 17. Deze zijn gericht op (i) ondersteuning van tenminste een miljoen IoT-toestellen per vierkante kilometer, (ii) batterijgebruik tussen 10-15 jaar, (iii) grotere dekking door verbetering van het bereik tussen het mobiele basisstation en het IoT-toestel²⁸ en (iv) lage complexiteit en kosten voor de IoT nodes, zie Figuur 6.

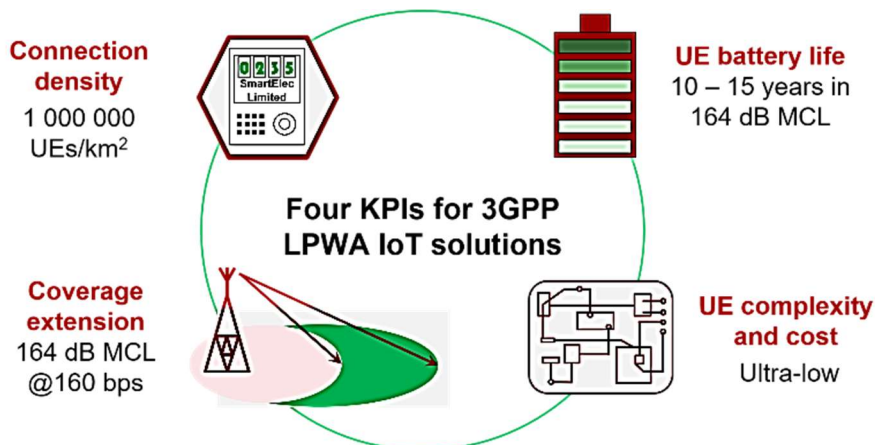
De reductie van het aantal signaleringsberichten en de mogelijkheid om op 'fijner' niveau per IoT node de radioresources te alloceren, maken het mogelijk om met 5G-technologie bovengenoemde minimale dichtheid van IoT-toestellen te ondersteunen²⁹. Dit is mogelijk onder de voorwaarde dat het IoT-verkeer per node beperkt is: per IoT node een bericht van maximaal 32 bytes per 2 uur en met de eis dat ieder pakket wordt ontvangen binnen 10 s op iedere locatie met voldoende signaalsterkte³⁰.

²⁷ Bron: sigfox.com/en/coverage, april 2019

²⁸ Doel hierbij: 164 dB voor *Maximum Coupling Loss* (MCL) bij een datasnelheid van 160 bit/s

²⁹ Zie simulatieresultaten in Sectie 7.1 in TR 37.910 v1.1.0, "Study on Self Evaluation towards IMT-2020 Submission (Release 16)", December 2018

³⁰ Aangeduid als alle locaties in een gebied tot en met de 99-percentile SINR (*Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio*)



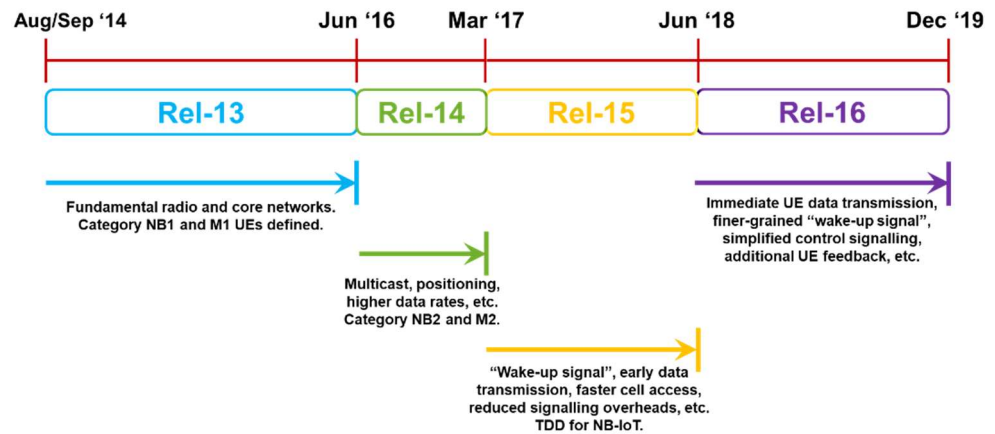
Figuur 6: De 3GPP-doelen voor de verdere verbeteringen van NB-IoT en LTE-M in Release 15 en Release 16³¹

Specifieke verbeteringen in 3GPP-specificaties om IoT-doelen in 5G te bereiken zijn:

- 1) Verlenging van batterijgebruik door bijvoorbeeld (i) langere DRX (*Discontinuous Reception*) tijdsintervallen (kleiner dan 40 minuten voor LTE-M en 3 uur voor NB-IoT), (ii) *wake-up*-signaal voor vermindering van de DL/UL overhead en (iii) eerdere dataverzending, dat wil zeggen al tijdens het opzetten van de verbinding.
- 2) Een lagere complexiteit en kostenreductie voor een IoT-toestel door:
 - a. De lage bandbreedte van het RF-sigitaal: bijvoorbeeld tot 180 kHz voor NB-IoT. Dit zal kosten van RF-hardware en processing hardware verminderen;
 - b. De definitie van de half-duplex modus die de RF-zender/ontvanger architectuur vereenvoudigt;
 - c. De introductie van een nieuwe categorie voor IoT-toestellen met lagere zendvermogens (bijvoorbeeld 20 dBm en 14 dBm) waardoor kleinere en goedkopere batterijen kunnen worden gebruikt;
 - d. Voor NB-IoT zijn verdere vereenvoudigingen in de specificaties doorgevoerd. Dit betreft onder meer de synchronisatie, modulatie en (de)codering, foutherstelling en heruitzending van IoT-signalen. Deze aanpassingen dragen bij aan de verminderingen van de complexiteit en kosten van een IoT node.
- 3) De verbeterde dekking wordt onder andere bereikt door pakketten herhaald te verzenden, het zendvermogen te concentreren in kleinere bandbreedtes en een kleinere PAPR (*Peak-to-Average-Power-Ratio*) toe te staan door toepassing van een andere modulatiemethode.

De geplande tijdslijnen voor deze IoT-aanpassingen in 3GPP Release 15 (afgerond in december 2018) en Release 16 zijn opgenomen in het 3GPP releaseplan in Figuur 7. De producten conform nieuwe 3GPP releases volgen meestal binnen een tot twee jaar.

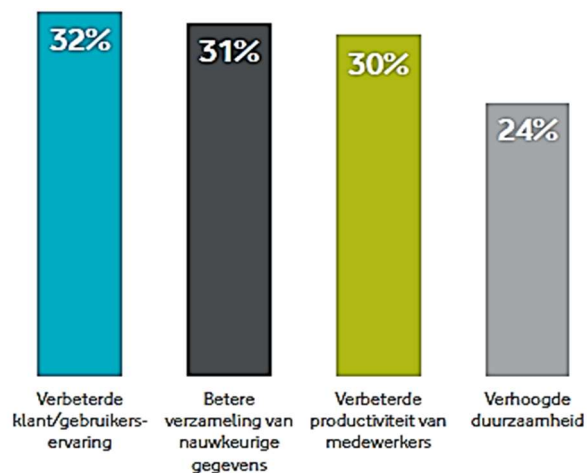
³¹ Bron: Huawei "3GPP's Low-Power Wide-Area IoT Solutions: NB-IoT and eMTC", RWS-180023, Workshop on 3GPP Submission towards IMT-2020, 24-25 October 2018, Brussels, Belgium



Figuur 7: 3GPP releaseplan voor IoT-standaardisatie in Release 13 t/m 16³²

2.2.4.6 Verwachtingen IoT door bedrijven

Het gebruik van IoT door bedrijven in Nederland en wereldwijd neemt snel toe. Volgens een onderzoek door Vodafone³³ maakte 34% van de ondervraagde bedrijven in 2018 gebruik van IoT-toepassingen. De grootste stijging in 2019 wordt verwacht in de sector logistiek en transport en in de sector industrie. IoT-toepassingen voor bedrijven hebben een toegevoegde waarde op meerdere vlakken, zie Figuur 8. Van de deelnemende bedrijven die al IoT-toepassingen gebruiken, geeft 74% aan deze in te zetten voor hun 'mission-critical' bedrijfsprocessen.



Figuur 8: IoT-acceptatie door de industrie: voordelen van IoT door geïnterviewde bedrijven³⁴

In de toekomst is de verwachting dat meer bedrijven gaan investeren in IoT-toepassingen. Er zijn diverse redenen voor deze verwachte trend:

- De brede introductie van IoT gaat sneller, eenvoudiger en goedkoper worden dan voor de eerste bedrijven het geval was. Dit komt omdat de technologie meer volwassen wordt (ook doordat oplossingen gebaseerd zijn op standaarden), diensten via landelijk-dekkende IoT netwerken beschikbaar zijn en producten en diensten goedkoper worden door massaproductie van IoT-

³² Bron: Huawei "3GPP's Low-Power Wide-Area IoT Solutions: NB-IoT and eMTC", RWS-180023, Workshop on 3GPP Submission towards IMT-2020, 24-25 October 2018, Brussels, Belgium

³³ Bron: Vodafone IoT Barometer 2019 "Your IoT Driven Future"

³⁴ Bron: Vodafone Nederland IoT Trendrapport 2018

modules en onderdelen en prijsreductie ten gevolge van competitie op de vergrootte markt is te verwachten;

- b) De algemene opkomst van *Artificial Intelligence (AI)*. AI-toepassingen in verschillende bedrijfsprocessen zijn veelal afhankelijk van de verzameling van grote hoeveelheden data om belangrijke trends te ontdekken en AI-gebaseerde optimalisatie te doen. Deze behoefte voor het verzamelen van grote hoeveelheden data, algemeen bekend als *Big Data*, vereist de installatie van goedkope en grootschalige IoT- toepassingen. Bedrijven die geen IoT-toepassingen gebruiken voor bijvoorbeeld AI-achtige verbeteringen hebben een vergroot risico om een achterstand op te lopen in vergelijking met concurrenten die wel gekozen hebben voor AI die is *empowered* met IoT-toepassingen.

2.3 Geavanceerde antennesystemen in 5G-netwerken

Geavanceerde antennesystemen ofwel *Advanced Antenna Systems* (AAS) vormen een belangrijke bouwsteen voor het radionetwerk van 5G. In AAS worden meerdere antennes gebruikt in zowel het basisstation als in de gebruikersapparatuur en zowel bij het verzenden als bij het ontvangen van radiosignalen. Hierbij worden geavanceerde technieken zoals *beamforming* en *MIMO* (*Multiple-Input, Multiple-Output*) toegepast om de capaciteit en dekking nog verder te verbeteren. Het gebruik van meerdere zend- en ontvangstantennes is niet nieuw: de eerste patenten zijn al in de jaren tachtig door Bell Labs verkregen. Recente technologische ontwikkelingen hebben er echter voor gezorgd dat het interessant wordt om deze technieken op grote schaal toe te passen, waarbij soms wel meer dan honderd antennes samenwerken om een signaal te verzenden. Dit laatste wordt *Massive MIMO* genoemd en is bij uitstek geschikt voor toepassing in *small cells* wanneer aldaar mmWave frequenties worden toegepast.

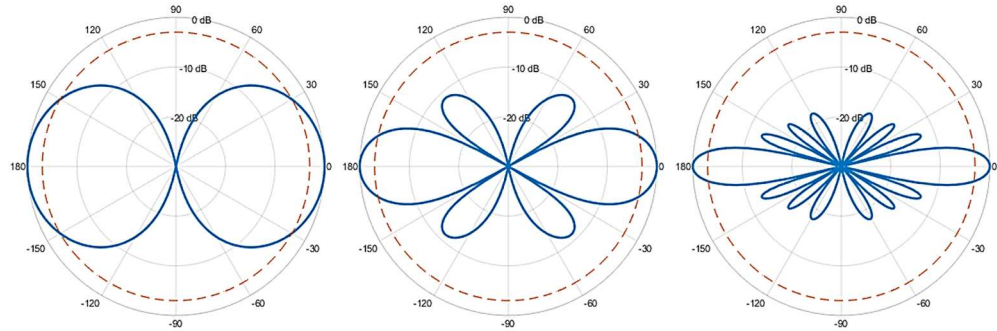
In dit hoofdstuk wordt een korte inleiding gegeven tot beamforming, MIMO en Massive MIMO. Daarnaast geeft het een overzicht van de laatste ontwikkelingen in implementaties hiervan door (commerciële) basisstations en gebruikersapparatuur.

Beamforming, MIMO en Massive MIMO (waarbij deze laatste twee van beamforming gebruik maken) zijn alle reeds jaren commercieel beschikbaar. Met name de eerste twee vinden al in 3G en 4G toepassing. Massive MIMO, waarbij er sprake is van minimaal 64 elementaire antennes, wordt continue verbeterd om steeds meer verschillende 5G-gebruikers tegelijkertijd via de radioweg te kunnen bedienen. De uitdagingen hierbij hebben ten dele betrekking op het samen kunnen laten werken met de rest van het 5G-systeem. Te denken valt daarbij aan het kunnen contacten van groepen gebruikers, het adequaat opvangen van variaties bij het (gedeeld) gebruik van de radioweg, een voor de synchronisatie van de verbinding voldoende snelle richtingsbepaling van de beam en vervolgens het *tracken* van de bestemming en het tegengaan van interferentie tussen verbindingen van gebruikers binnen een cel maar ook tussen gebruikers in aangrenzende cellen. Daarnaast zijn er implementatie-aspecten zoals afvoer van warmte, beperking van de productiecomplexiteit en -kosten.

2.3.1 *Beamforming*

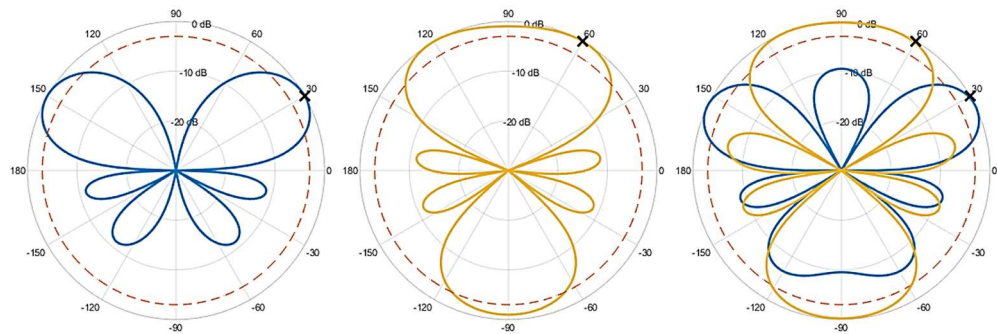
Beamforming is een techniek die in MIMO en Massive MIMO wordt toegepast en die meerdere zendantennes tegelijkertijd gebruikt om de energie van de radiogolven niet rondom uit te zenden, maar naar een bepaalde gebruiker te richten in een zogenaamde bundel of *beam*. Dat werkt als volgt: als meerdere antennes allemaal hetzelfde signaal uitzenden, zullen deze signalen op sommige plekken elkaar versterken (constructief interfereren) en op andere plekken elkaar opheffen (destructief interfereren). Het gecombineerde zendpatroon, dat de uitgezonden signaalsterkte aangeeft voor verschillende hoeken rondom een zender, krijgt dus voor bepaalde hoeken extra (lokale) maxima en minima. Hoe meer antennes er gebruikt worden, hoe meer van deze maxima en minima zullen ontstaan. Straks zal blijken dat dit het aantal aan te sturen gebruikers beperkt wanneer zogenaamde *zero forcing* wordt toegepast. Figuur 9 laat in het blauw van links naar rechts de gecombineerde zendpatronen van twee, vier en acht standaardantennes zien. Naast het ontstaan van meer maxima en minima is ook duidelijk te zien dat de

beams in de richting van 0 en 180 graden smaller worden naarmate er meer antennes worden gebruikt³⁵.



Figuur 9: In het blauw het bovenaanzicht van de gecombineerde zendpatronen van twee (links), vier (midden) en acht (rechts) antennes. De antennes staan in dit geval op de lijn tussen -90 en 90 graden. Als referentie laat de rode lijn zien waar het uitgezonden vermogen de helft is t.o.v. het maximale vermogen

In een AAS heeft iedere antenne afzonderlijk de mogelijkheid om de fase en amplitude van het radiosignaal nog aan te passen voordat het uitgezonden wordt. Als dit op een 'slimme' manier gebeurt, kan ervoor gezorgd worden dat de signalen constructief interfereren als ze ontvangen worden door de gebruiker. Hierdoor kan het maximum (de beam) dus niet alleen gericht worden naar 0 en 180 graden, zoals in Figuur 9, maar kan het meebewegen met de locatie van de gebruiker. Bovendien kan ervoor gezorgd worden dat de signalen destructief interfereren waar dat gewenst is – bijvoorbeeld waar ze ontvangen worden door *andere* gebruikers. Op die manier veroorzaakt een beam naar de ene gebruiker relatief weinig interferentie voor de overige gebruikers. In de literatuur wordt dit *zero forcing* of *null forming* genoemd.



Figuur 10: In het blauw het bovenaanzicht van het gecombineerde zendpatroon voor een gebruiker op 30 graden (links), in het geel voor een gebruiker op 60 graden (midden) en de patronen als zero forcing wordt toegepast (rechts). De vier antennes staan in dit geval op de lijn tussen -90 en 90 graden. Als referentie laat de rode lijn zien waar het uitgezonden vermogen de helft is t.o.v. het maximale vermogen

Figuur 10 laat deze gecombineerde aanpak zien voor vier antennes: uiterst links wordt de beam gericht naar een gebruiker die zich op 30 graden bevindt en in het middelste deel naar een gebruiker op 60 graden. Uiterst rechts wordt het effect van zero forcing duidelijk. De maxima van beide patronen liggen daar niet meer precies op 30 en 60 graden maar er is wel duidelijk een minimum geforceerd bij het andere patroon op respectievelijk 60 en 30 graden. De interferentie van een beam op de

³⁵ Geavanceerde antennes zullen zo worden ontworpen dat aan een kant bundels ontstaan

andere gebruikers wordt dus significant teruggebracht slechts ten koste van een gering verschoven maximum naar de bedoelde gebruiker.

Als vuistregel geldt dat het maximaal aantal afzonderlijke beams dat een AAS kan vormen, nooit meer is dan het aantal antennes: met 64 zendantennes kunnen dus nooit meer dan 64 beams gevormd worden. In de praktijk ligt dit aantal echter veel lager, ongeveer 8 beams met 64 antennes. Per beam wordt het namelijk ook moeilijker om geen interferentie te veroorzaken voor de andere beams. Zo is rechts in Figuur 10 al voor vier antennes te zien dat de niveaus van de zijbundels duidelijk zijn toegenomen. Dit heeft voor een praktisch aantal antennes geen negatief effect op de zero forcing: het basisstation kan dan zorgen dat de signalen van de bediende gebruikers niet interfereren. Dat het patroon in andere richtingen dan sterker wordt, maakt in principe niet uit; in theorie mogelijk alleen voor die gebruikers die door een ander, nabijgelegen basisstation bediend worden.

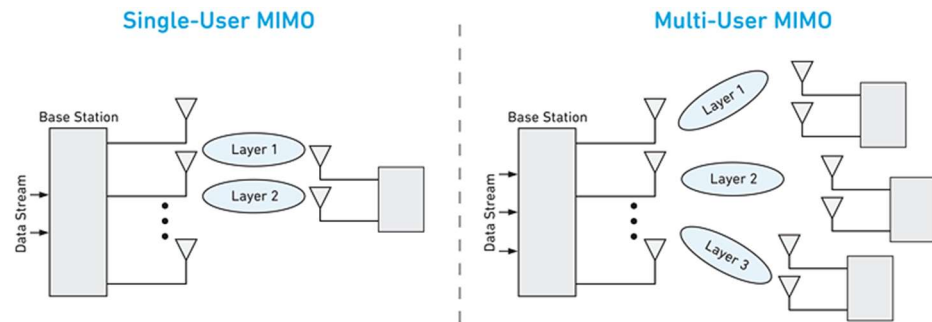
Het verhogen van het aantal antennes zal steeds minder extra reductie van interferentie opleveren voor andere 5G-gebruikers die bediend worden door hetzelfde basisstation. Dit zal voorbij een bepaald aantal antennes uiteindelijk niet meer opwegen tegen de nadelen zoals de extra kosten per antenne, warmteafvoer, productiecomplexiteit en de met het aantal antennes toenemende rekentijd benodigd voor het bepalen van alle beams.

2.3.2 MIMO

Onder MIMO (*Multiple-Input, Multiple-Output*) vallen verschillende technieken, die alle gebruik maken van het maken en sturen van beams via beamforming zoals in de vorige paragraaf toegelicht. Deze technieken maken het mogelijk om meerdere datastromen (in 3GPP-terminologie: *layers*) op hetzelfde moment en op dezelfde frequentie te versturen en daarmee de capaciteit te vergroten. Dit is mogelijk als het radiokanaal genoeg varieert over tijd en ruimte. In dat geval is het vaak beter om niet op vol vermogen één layer te versturen, maar om het vermogen op te splitsen en te gebruiken voor meerdere layers. Hier zijn twee varianten mogelijk: *single-user MIMO* (SU-MIMO) en *multi-user MIMO* (MU-MIMO).

Bij SU-MIMO stuurt het basisstation meerdere layers naar één gebruiker, die dan bijvoorbeeld kan chatten tijdens ontvangst van een YouTube-filmpje. De datastroom wordt door het basisstation gesplitst, over verschillende layers verstuurd en door de gebruikersapparatuur weer samengevoegd. Dit is haalbaar als er meerdere, ongeveer even sterke radiopaden in verschillende richtingen bestaan tussen het basisstation en de gebruiker waardoor de layers van elkaar kunnen worden onderscheiden of door gebruik te maken van verschillende polarisaties. In de praktijk is het lastig om meer dan twee layers naar één gebruiker te sturen en ze daar weer te onderscheiden, omdat de antennes in gebruikersapparatuur relatief dicht bij elkaar zitten.

Bij MU-MIMO worden er ook meerdere layers door het basisstation verstuurd, maar nu naar verschillende gebruikers: iedere gebruiker krijgt zijn eigen layer. MU-MIMO gaat er dus van uit dat er meerdere gebruikers zijn die op hetzelfde moment data nodig hebben. Het aantal praktisch haalbare layers ligt in dit geval hoger, omdat de ontvangstantennes niet meer allemaal op één apparaat zitten, maar veel meer verspreid zijn over de verschillende apparaten. Figuur 11 geeft het basale verschil aan van beide MIMO-technieken.



Figuur 11: SU-MIMO (links) en MU-MIMO (rechts)³⁶

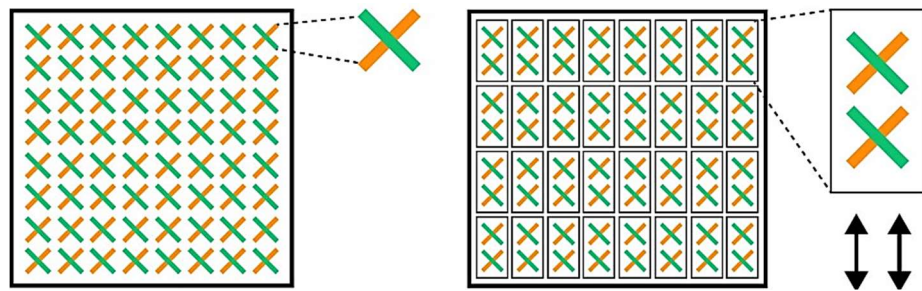
2.3.3 Massive MIMO

Zowel SU-MIMO als MU-MIMO lenen zich er uitstekend voor om gebruikt te worden in combinatie met beamforming. Iedere layer kan op een dussdanige wijze 'gebeamformed' worden dat hij door zero forcing relatief weinig interferentie oplevert voor de andere layers. Het maakt dan niet uit of die layers naar eenzelfde of meerdere, verschillende gebruikers gaan omdat in het geval van SU-MIMO ofwel de signalen van de layers onderling verschillende polarisaties hebben, ofwel door sterke reflecties die ene ontvanger toch via diverse richtingen kunnen bereiken. Het niveau van interferentie hangt sterk samen met het aantal zendantennes: globaal kan worden gesteld dat hoe meer antennes een basisstation heeft, hoe smaller de beam wordt (zie Figuur 9) en des te gemakkelijker het in principe wordt om de interferentie te onderdrukken. Moderne SU-MIMO en MU-MIMO basisstations hebben om die reden vaak tientallen antennes en worden dan aangeduid als Massive MIMO (mMIMO) basisstations. Over de precieze definitie van 'massive' (het aantal elementaire antennes) is nog veel discussie. Het zijn er in ieder geval meer dan het maximale aantal gebruikers dat tegelijkertijd bediend kan worden. Uit de eerdere vaststelling omtrent het praktisch maximum aan het aantal gelijktijdige beams volgt dat dit er ongeveer 8 kunnen zijn. Dit is voldoende want een basisstation heeft zeer zelden meer dan 8 gebruikers die gelijktijdig om data vragen, temeer omdat verkeerspatronen vaak heel *bursty* zijn: een paar milliseconden een stukje video bufferen, even Whatsapp synchroniseren, et cetera.

2.3.4 Implementaties in basisstations

Om (Massive) MIMO te ondersteunen in het basisstation wordt vaak gebruik gemaakt van een *antenne-array*. Een antenne-array bestaat uit meerdere *sub-arrays*, die elk weer bestaat uit meerdere elementaire antennes, doorgaans met twee verschillende polarisaties. Een sub-array is het kleinst aanstuurbare deel van de antenne-array: de specifieke fase en amplitude worden op alle antennes met dezelfde polarisatie binnen een sub-array toegepast. Het voordeel hiervan is dat niet iedere antenne een eigen RF-keten nodig heeft. Dit maakt het makkelijker en bovendien een stuk goedkoper om basisstation-antennes te produceren. Figuur 12 laat een mogelijke configuratie zien.

³⁶ <https://www.mwrf.com/semiconductors/realizing-5g-sub-6-ghz-massive-mimo-using-gan>



Figuur 12: Een antenne-array, bestaande uit antennes met twee polarisaties (links). De array is opgedeeld in sub-arrays die twee RF-ketens hebben, een per polarisatie (rechts)³⁷

2.3.5 Implementaties in gebruikersapparatuur

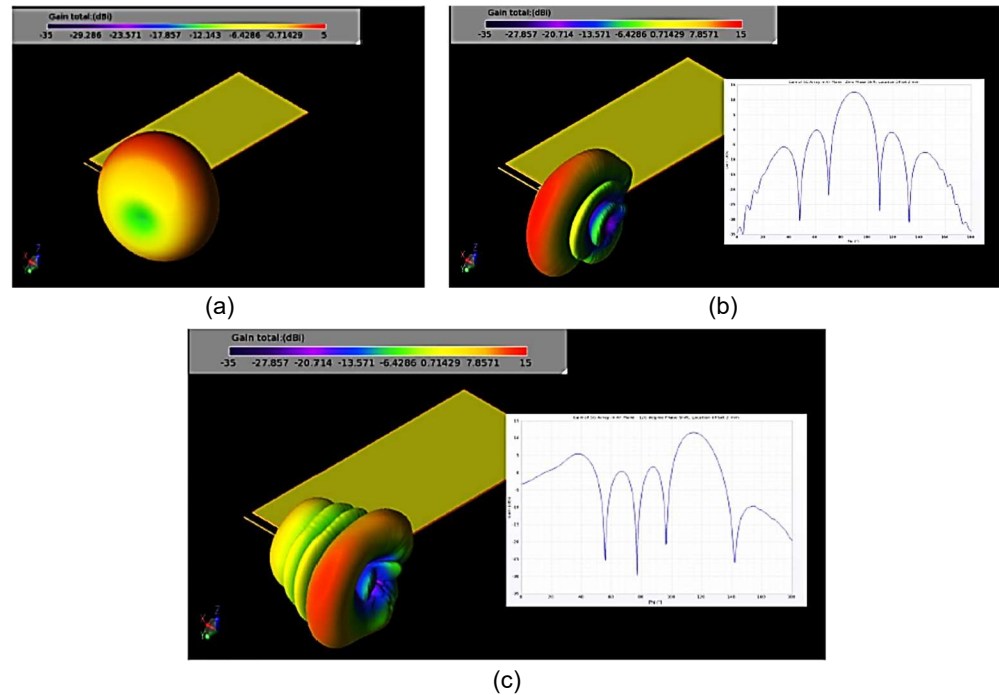
In gebruikersapparatuur kan het ook interessant zijn om een antenne-array te gebruiken voor het beter uitzenden of ontvangen van het RF-signaal. In de hogere frequentiebanden zoals de door de EU aangewezen 5G banden op 3,5 GHz en 26 GHz, zijn de signaalpropagatieverliezen wezenlijk hoger dan voor de lagere banden. Om hiervoor te compenseren moeten zowel basisstations als gebruikersapparatuur beamforming toepassen om de energie te bundelen in de juiste richting.

De antenne-array in gebruikersapparatuur kan gebruikt worden om:

- a) Het maken van een snelle en adaptieve scan van de omliggende basisstations en de optimale richting te ontdekken voor de link met het beste basisstation. Dit gebeurt met een zogenaamde *beam scan*. Deze scan is belangrijk als het signaal van/naar het basisstation opeens geblokkeerd wordt door een hand, een lichaam of door andere obstakels, omdat de apparatuur dan snel een nieuwe link moet vinden. Van alle basisstations wordt ook de *signal-to-interference-plus-noise ratio* (SINR) bepaald, zodat de beste snel gekozen kan worden als dat nodig is. De beam scan kan ook helpen bij de hand-over tussen nabijgelegen basisstations.
- b) Het verbeteren van de dekking door bij het verzenden (of ontvangen) van de signalen deze slim te combineren zoals dat gebeurt bij basisstations. Dit zal de SINR ook verbeteren, hetgeen weer zorgt voor hogere datasnelheden.

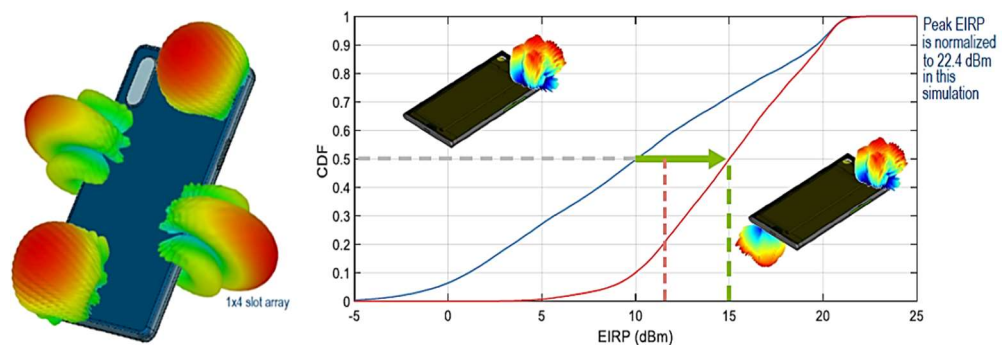
Afhankelijk van het aantal antennes in de antenne-array (Qualcomm noemt bijvoorbeeld tussen de 4 en 32 voor gebruikersapparatuur) kan de resulterende beam scherper worden gevormd en kan ook een hogere *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP) bereikt worden. Zoals bij basisstations kan iedere antenne de fase en amplitude van het signaal beïnvloeden waardoor de energie in een bepaalde richting maximaal uitgezonden of ontvangen kan worden. Figuur 13 toont enkele zendpatronen voor een mobiele telefoon met een antenne-array van vier antennes, gesimuleerd op 28 GHz.

³⁷ <https://www.ericsson.com/en/white-papers/advanced-antenna-systems-for-5g-networks>



Figuur 13: Simulatie van 3D zendpatroon van een antenne-array in gebruikersapparatuur op 28 GHz: (a) 4G rondstralend zendpatroon; (b) antenne-array zonder extra fases met maximum 12,5 dBi gain in xy- richting; (c) antenne-array met fases om een maximum te creëren op 24,5 graden in het xy-vlak³⁸

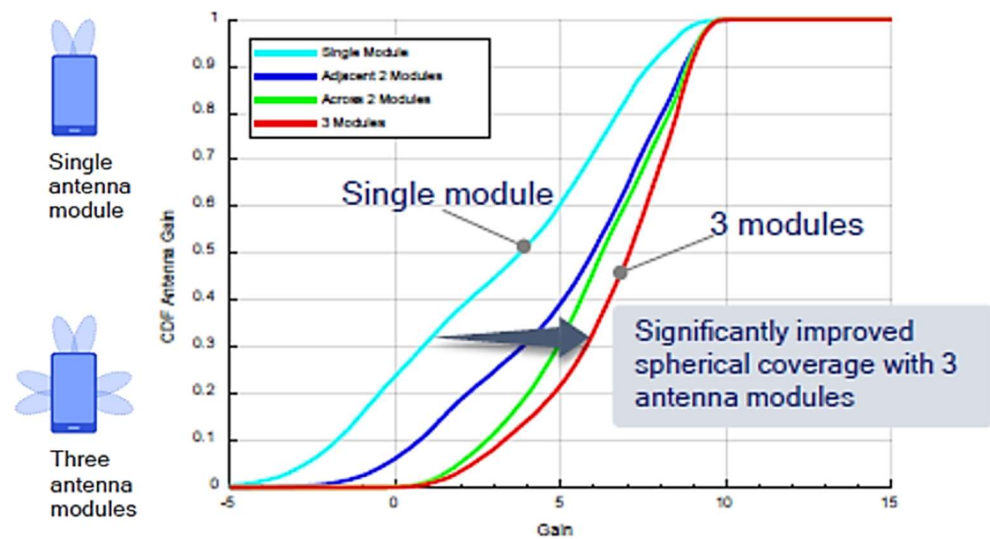
In gebruikersapparatuur is het van essentieel belang dat signalen in elke richting ontvangen en uitgezonden kunnen worden, omdat een mobiele telefoon qua oriëntatie veel beweegt en van tijd tot tijd anders vastgehouden wordt waardoor het radiosignaal in bepaalde richtingen wezenlijk afgezwakt zou kunnen worden. Men spreekt dan over een goede *spherical coverage*. Om deze te bereiken, is het nodig dat er meerdere antenne-array modules in de gebruikersapparatuur geïmplementeerd worden. Om meerdere opties met elkaar te vergelijken gebruikt men vaak de CDF (*Cumulative Distribution Function*) van de beam scan, dat wil zeggen de CDF van de maximale EIRP of -gain van alle modules in een bepaalde richting. Figuur 14 en Figuur 15 geven voorbeelden van zulke CDFs.



Figuur 14: Analyse van een simulatie van multiple antennemodules voor *spherical coverage*-eerste voorbeeld³⁹

³⁸ REMCOM: 5G/4G Combined Antenna Analysis in a Smartphone using EM Simulation

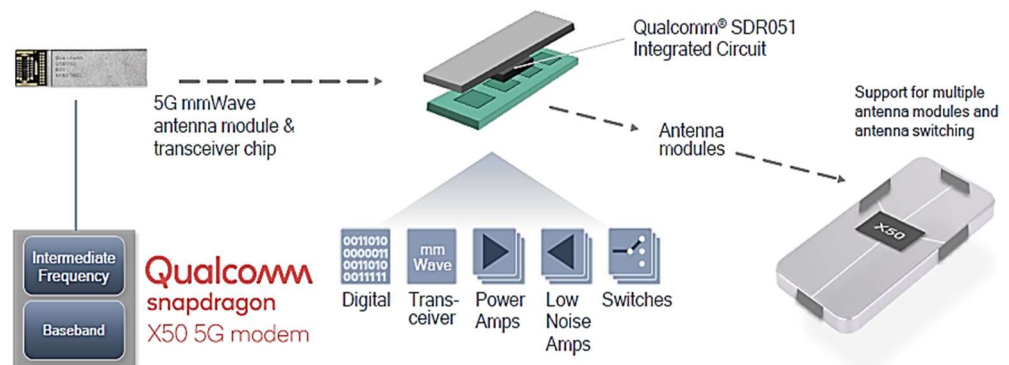
³⁹ M. Rutschlin, „5G Antenna Design for Mobile Phones,” *SIMULIA EM eSeminar Series*, 2018



Figuur 15: Analyse van een simulatie van multiple antennemodules voor *spherical coverage*-tweede voorbeeld⁴⁰

De eerste commerciële 5G smartphones, bijvoorbeeld gebaseerd op Qualcomm's 5G modem X50 en de QTM052 RF antennemodules, zullen uitgerust zijn met meerdere antenne-array modules, bijvoorbeeld aan de verschillende kanten van de smartphone. Ook zullen de mmWave-frequenties (dat wil zeggen hoger dan 6 GHz) ondersteund worden, zie Figuur 16.

Voor diepgaandere analyses wordt de lezer verwezen naar literatuur over 5G en LTE antenne-ontwerp⁴¹ en over antenne-arrays voor de 60 GHz frequentieband⁴².



Figuur 16: Qualcomm X50 5G NR modem en QTM052 RF-antennemodule oplossing voor 5G smartphones³⁹

⁴⁰ Qualcomm, „Breaking the wireless barriers to mobilize 5G NR mmWave,” 2019

⁴¹ J. Kurvinen, „Co-Designed mm-Wave and LTE Handset Antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, nr. 3, 2019

⁴² W. Hong, „Millimeter-Wave 5G Antennas for Smartphones: Overview and Experimental Demonstration,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, nr. 12, 2017

2.4 Sharing by slicing

Met de opkomst van 5G dient zich een nieuw telecommunicatieparadigma aan, genaamd *network slicing*: het nagenoeg volledig in software implementeren van een functioneel netwerk. Dat biedt mogelijkheden qua flexibiliteit, schaalbaarheid, efficiënt gebruik van fysieke infrastructuur en het op maat aanbieden van netwerkdiensten aan verschillende gebruikersgroepen met verschillende eisen. Voorbeelden zijn de bankwereld en Openbare Orde en Veiligheid (OOV) waarbij tijdigheid, directe beschikbaarheid, betrouwbaarheid en veiligheid essentieel zijn. Voor bijvoorbeeld energieleveranciers zijn ook betrouwbaarheid en veiligheid belangrijk (denk aan *smart meters*) maar tijdigheid veel minder. Allerlei logistieke processen binnen bijvoorbeeld de groothandel vallen in dit profiel. Zo zijn er vele gebruikersgroepen met elke zijn specifieke eisen.

In deze paragraaf wordt het onderwerp netwerk slicing nader toegelicht. Omdat diverse begrippen verband houden met netwerk slicing en uitleg daarvan nodig is voor begrip van het concept netwerk slicing worden deze eerst besproken en wel vaak in historisch perspectief.

2.4.1 *Quality-of-service*

Zoals bekend is het publieke internet het geheel van wereldwijd onderling gekoppelde pakket-geschakelde communicatienetwerken en biedt daarmee een uniforme netwerklaag op basis van het IP-protocol aan een rijk geschakeerd palet aan communicatie- en informatietoepassingen. Een wezenlijke beperking van IP was echter het ontbreken van een mechanisme om *quality-of-service* (QoS) te reguleren, wat van belang kan zijn voor bepaalde toepassingen zoals tijdkritische.

2.4.1.1 *Onderscheid in afhandeling van verkeer o.b.v. QoS*

Dataverkeer werd en wordt nog steeds op basis van 'best effort' en non-discriminatoir afgehandeld. Bij een groter verkeersaanbod dan wat het netwerk aankan, wat typisch in bepaalde toegangs-netwerken zoals mobiele netwerken kan optreden, wordt het wachtrijprincipe toegepast. In geval van capaciteits-schaarste zijn dan op (een deel van) de verbinding concessies qua datasnelheid en vertraging onvermijdelijk. Inmiddels biedt het IP-protocol wel een aantal instrumenten om QoS tot op zekere hoogte te faciliteren. In hedendaagse mobiele netwerken geldt het 'best effort' beginsel nog onverkort maar zijn wel instrumenten gestandaardiseerd waarmee verkeersstromen verschillend kunnen worden behandeld. Iedere verkeersstroom laat zich karakteriseren door een zogenaamde QCI-indicator (*Quality Class Indicator*, in 5G aangeduid met 5QI). Het netwerk, zoals nu 4G, gebruikt de waarde van de QCI-indicator bij de toewijzing van schaarse radiokanaalcapaciteit aan het dataverkeer. Bepaald verkeer kan voorrang worden gegeven (in snelheid en/of betrouwbaarheid) boven ander verkeer. Door dit prioriteitsmechanisme is er geen absolute garantie op de levering van een gewenste QoS voor een bepaalde verkeersstroom, maar de kans dat deze wordt bereikt is wel veel groter dan wanneer deze instrumenten er niet waren.

2.4.1.2 *Netneutraliteit en QoS-differentiatie*

Bij de toepassing van QoS-differentiatie moeten operators rekening houden met de regels voor netneutraliteit. Als de QoS-differentiatie wordt toegepast voor verkeersmanagement binnen een internettoegangsdienst bepalen de regels onder

meer dat de QoS-differentiatie gebaseerd moet zijn op objectief verschillende technische QoS-eisen van de verschillende verkeersstromen. Deze eisen hangen samen met de applicaties die van de verkeersstromen gebruik maken. Een bepaalde QoS-categorie mag overigens niet worden 'afgesloten' door een operator voor applicaties met verkeersstromen die eigenlijk beter bij een andere QoS-categorie zouden passen: het is aan de eindgebruiker of aan de dienstleverancier om de juiste QoS-categorie te selecteren.

2.4.2 *Virtualisering binnen communicatiewerken*

De laatste jaren zijn er in de IT-wereld belangrijke ontwikkelingen geweest op het gebied van virtualisering. Virtualisering in de IT komt erop neer dat men op krachtige, generieke computer hardware een willekeurige aantal virtuele computersystemen kan laten draaien. Elk systeem kan beschikken over een eigen, onafhankelijk besturingssysteem. Vanuit een applicatie gezien gedraagt een virtueel computersysteem zich niet anders dan een specifiek fysiek systeem. Deze opzet biedt belangrijke voordelen wat betreft flexibiliteit, schaalbaarheid en kostenbesparing.

2.4.2.1 *Network Function Virtualisation*

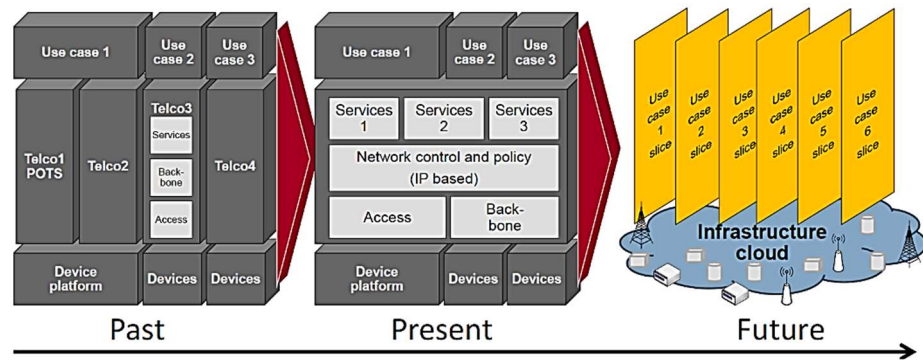
Virtualisering vindt tegenwoordig ook zijn toepassing in communicatienetwerken en wordt aangeduid met *Network Function Virtualisation* (NFV). Het Europese standaardisatie-orgaan ETSI heeft belangrijk werk verricht wat betreft de standaardisatie van netwerken op basis van NFV. Virtualisering maakt een nieuwe manier van flexibel beheer en uitrol mogelijk waarvoor de naam orkestratie in gebruik is. Het voorgestelde beheermodel is bekend onder de naam ETSI MANO (*Management and Orchestration*).

2.4.2.2 *Software Defined Networking*

Een andere veel gebezigde term is *Software Defined Networking* (SDN) maar dit betreft feitelijk alleen het automatiseren van bepaalde functies in het netwerk zodanig dat die functies vanuit een centraal punt kunnen worden gemanaged en aangestuurd. SDN en NFV zijn wel goed te combineren. NFV-technologie biedt de mogelijkheid om meerdere software-uitvoeringen (instanties) van bepaalde netwerkfuncties te creëren en te laten uitvoeren op dezelfde hardware-infrastructuur.

2.4.3 *Netwerk slicing*

Een volgende belangrijke ontwikkeling is die van *slicing* (of meer volledig: *netwerk slicing*) waarmee ten eerste convergentie van infrastructuren voor diverse toepassingen of 'verticals' op een nog ander niveau gaat ontstaan (zie Figuur 17) en ten tweede vanuit de technologie een alternatief wordt aangereikt voor het gedifferentieerd kunnen behandelen van verkeer. Na een bondige toelichting op het slicing-concept komen we terug op het belang ervan voor QoS-beheersing.



Figuur 17: Convergentie van Infrastructuren voor verschillende use cases/toepassingen. De partitie in zogenaamde slices (meest rechts) is volledig in software⁴³

Slicing is de aanduiding voor het realiseren van meerdere virtuele netwerken op een gemeenschappelijke fysieke infrastructuur, waarbij NFV en SDN belangrijke *enabling* technieken zijn. Slicing als basisconcept is al een aantal jaren bekend en in de literatuur reeds vrij uitvoerig beschreven maar heeft bij de standaardisatie van volgende generaties mobiele netwerken (met name 5G) veel expliciete aandacht gekregen van onder andere 3GPP en GSMA (*Global System for Mobile Communications Association*). Hierbij baseren deze organisaties zich op een aantal eerder door NGMN (*Next Generation Mobile Network*) Alliance geïntroduceerde definities en constructen. Met andere woorden: er is een voorsortering gemaakt op mogelijke implementatie-concepten voor slicing, zodanig dat die goed aansluiten op de behoeften van telecommunicatie-operators.

Een uitvoerige verhandeling over slicing gaat voor de Monitor Draadloze Technologie te ver, maar we lichten hier enkele belangrijke noties toe, geënt op de door NGMN Alliance en 3GPP aangebrachte (ingeperkte) context:

- Binnen één *Mobile Network Operator* (MNO) domein kunnen meerdere slices worden gecreëerd die geheel onafhankelijk van elkaar kunnen worden geconfigureerd en desgewenst geëxploiteerd door één of meerdere verschillende *Communication Service Providers* (in conventionele termen: MVNO's: Mobile Virtual Network Operators). Iedere afzonderlijke slice gedraagt zich als een volwaardig, eigenstandig mobiel netwerk. Het aantal slices dat een individuele MNO (Mobile Network Operator) kan ondersteunen is in administratieve zin niet begrensd, met dien verstande dat zijn onderliggende infrastructuur het maximaal mogelijke capaciteitsbeslag van alle slices bij elkaar aan moet kunnen (immers, anders ontstaan er schaarste-effecten op het niveau van individuele slices die de betreffende SLA's (Service Level Agreements) kunnen invalideren). Slicing met betrokkenheid van meerdere operators is nog niet aan de orde;
- Op dit moment ondersteunen de standaarden⁴⁴ een drietal standaard slice types namelijk eMBB (*enhanced Mobile Broadband*), URLLC (*ultra Reliable Low Latency*) en mIoT (*massive Internet of Things*). Dat is dus nog een vrij grove typering die rechtstreeks is gekoppeld aan de drie belangrijkste servicetypen in 5G. Deze typering zal waarschijnlijk in de nabije toekomst verder worden uitgebreid en bovendien kunnen operators zogenaamde slices definiëren. GSMA houdt zich op dit moment bezig met additionele slice-typen en slice-templates en stelt zich ook op het standpunt dat slices meerdere

⁴³ Bron: T-Systems

⁴⁴ TS 23.501

operatornetwerken zouden moeten kunnen overspannen. Op dit moment is dit dus afwijkend van 3GPP-keuzes. Voor een gegeven slice type kan een operator nog vele individuele slices definiëren bijvoorbeeld voor het bedienen van specifieke *verticals* of andere *slice customers*.

- Een mobiele terminal zoals een smartphone kan simultaan met maximaal 8 verschillende slices verbonden zijn, maar wel alle behorend bij dezelfde MNO.
- De slicing-technologie kan momenteel volledig worden doorgevoerd in het mobiele *core network*, waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen netwerkfuncties die aan specifieke slices zijn toegekend en netwerkfuncties die gedeeld worden door meerdere slices.

Toepassing van slicing in het mobiele (*Radio Access Network*, RAN) ligt ingewikkelder. In het RAN is sprake van radionetwerkcomponenten die ieder een zekere mate van slice awareness zullen hebben, wat wil zeggen dat deze componenten hun radiocapaciteit zullen verdelen over de verschillende slices. Ook zullen de radiocomponenten in staat zijn om de signalering van slice informatie vanuit de mobiele terminal te interpreteren en te relateren aan signalering met het mobiele core network. Met een dynamische toekenning van radio resources aan individuele slices is het in theorie mogelijk om qua spectrumefficiëntie voordeel te behalen ten opzichte van de toepassing van separate fysieke netwerken met eigen spectrumblokken.

- Binnen één slice is de gehele QoS-instrumentatie (met gebruik van QCI's) aanwezig zoals die er ook is in een fysiek netwerk. Een slice kan ook weer een overkoepelende QoS hebben, voor bijvoorbeeld nooddiensten.

Een meer technische verhandeling over slicing is opgenomen in de Monitor Draadloze Technologie *special* omtrent 5G van het najaar 2017. Voor verdere studie verwijzen wij naar de Technical Specifications TS 28.530 en TS 28.533.

Terugkomend op de betekenis van slicing voor de gedifferentieerde behandeling van verkeer kan worden gesteld dat een MNO met dit concept zijn dienstverlening volledig kan differentiëren. Ook bij het inzetten van slicing moeten operators rekening houden met de regels voor netneutraliteit. Afhankelijk van waarvoor ze slicing inzetten zijn de regels voor internettoegangsdiensten van toepassing, de regels voor zogenaamde gespecialiseerde diensten, of beide. Het instrument slicing biedt veel verder strekkende mogelijkheden omdat de dienst als geheel op maat zou kunnen worden gemaakt voor bijvoorbeeld een bepaalde categorie gebruikers zoals de industrie, zwaailichtsector of voor voertuigen. De netneutraliteitsregels leggen geen a priori beperkingen op maar wel zal per geval moeten worden bekeken hoe de regels uitwerken, afhankelijk van onder meer de implementatie in het netwerk en de technische eisen van de diensten.

2.4.4 *De toekomst van netwerk slicing*

De verdere ontwikkeling in de standaardisatie van slicing zal markt- c.q. vraag-gestuurd verlopen maar ook afhangen van de duiding door nationale regulators. Daarbij is de situatie in Azië en de VS anders dan in Europa en worden bijvoorbeeld de Amerikaanse netneutraliteitsregels juist afgeschaft. Nu slicing voor operators, dienstaanbieders en toezichthouders dichterbij komt met de uitrol van de eerste 5G-netwerken, is onze verwachting dat de discussie in Europa zich spoedig verplaatst naar concrete use cases voorgesteld vanuit industrie, voertuigen en andere sectoren. De praktische uitkomsten daarvan zullen nuttig zijn voor het verder vormgeven van het gebruik van slicing door operators en dienstaanbieders.

2.5 Machine learning en draadloze communicatie

2.5.1 Inleiding

De technologie aangeduid met Machine learning (ML) maakt onderdeel uit van het brede 'containerbegrip' kunstmatige intelligentie ofwel Artificial Intelligence (AI). Machine learning is het continue aanpassen, c.q. verbeteren van methoden ofwel algoritmes door de computer zelf als gevolg van steeds meer invoergegevens die in de loop van de tijd, de 'leerperiode' of trainingsfase, beter geclassificeerd kunnen worden. Je zou kunnen zeggen dat de computer door middel van algoritmes zelf regels opstelt om (soms vooronderstelde) invoergegevens te koppelen aan gegeven uitkomsten. In vrijwel alle gevallen gaat het om statistische methoden waarmee zeer complexe processen gesimuleerd worden. De opzet is dat na een 'leerperiode' de computer in staat is om voor bepaalde invoerdata, de uitkomst met praktische betrouwbaarheid te voorspellen.

ML wordt al op een aantal gebieden toegepast en staat volop in de belangstelling van de academische, industriële en zakenwereld. De verwachting is dan ook dat ML in de komende jaren *booming* wordt. De vraag is in hoeverre dit ook geldt voor de toepassing van ML voor de verbetering van draadloze telecommunicatie en wat dit dan kan betekenen. Voordat hierop wordt ingegaan in de volgende paragraaf volgt eerst in deze inleiding iets meer over ML.

Globaal zijn vier standaard-strategieën van ML te onderscheiden⁴⁵:

Supervised learning

Bij supervised learning tracht de computer zelf op iteratieve wijze associaties te leggen tussen een (mogelijk aanzienlijke) set van invoergegevens en bijbehorende uitkomsten. Deze training-set is vaak door een mens, de 'supervisor' van het systeem, verzameld en geclassificeerd. De computer probeert deze associaties samen te vatten in universele regels. De bedoeling is dat deze zo goed worden dat op grond van nieuwe invoergegevens met acceptabele betrouwbaarheid uitkomsten voorspeld kunnen worden. Voorbeelden: spamdetectie, expressieherkenning in gezichten, persoonsherkenning.

Unsupervised learning

In geval van unsupervised learning krijgt de computer alleen grote hoeveelheden, ongeclassificeerde invoergegevens. De computer probeert vast te stellen of er verbanden of overeenkomsten bestaan tussen deze gegevens en zo patronen te ontdekken (bijvoorbeeld groepering van klanten naar hun aankoopgedrag, herkennen van ongewoon gedrag).

Semi-supervised learning

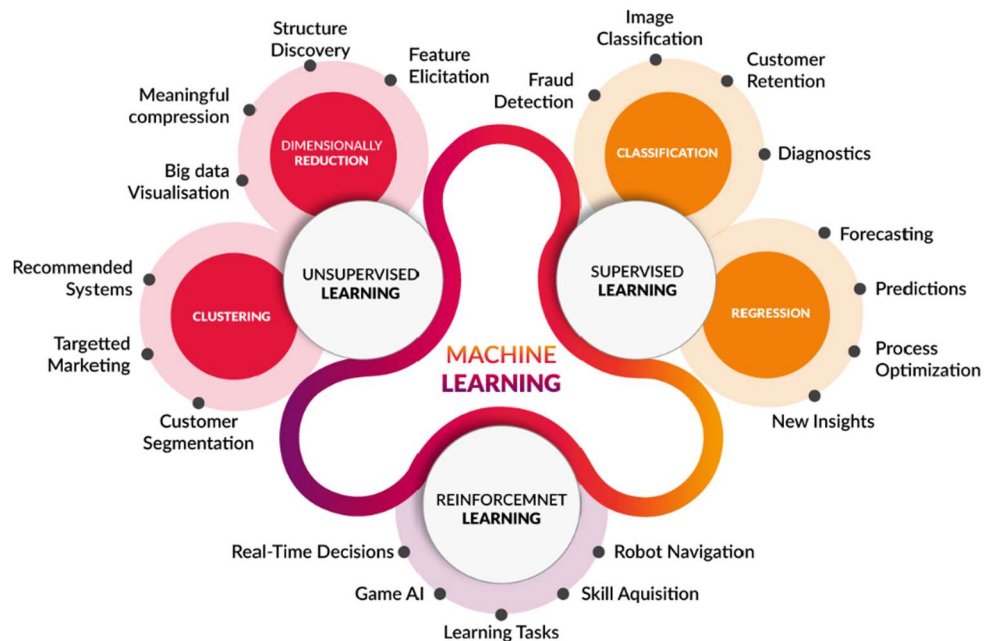
Bij semi-supervised learning krijgt de computer een groot aantal ongeclassificeerde invoergegevens en slechts een aantal geclassificeerde. Ook kan bepaalde data ontbreken. De bedoeling is nu dat unsupervised learning ingezet wordt om *best guess* voorspellingen te doen voor de classificering van de invoergegevens zodat deze met de beschikbare uitkomsten kunnen worden gebruikt als trainingsset door supervised learning. Een voorbeeld is een fotoarchief waar maar een paar beelden van zijn gelabeld (foto van een huis, bos, et cetera).

⁴⁵ <https://e-sites.nl/blogs-downloads/machine-learning-een-korte-toelichting-op-de-techniek-en-toepassing>

Reinforcement learning

Deze vorm gebruikt een beloningsmechanisme (reinforcement) voor goede associaties tussen invoergegevens en uitkomsten. Reinforcement wordt vaak in combinatie met een andere vorm toegepast om tot betere resultaten te komen. Zoals de naam al doet vermoeden, verbetert het systeem zich op deze manier.

Machine learning vindt al toepassing op een aantal gebieden, gerelateerd aan patroonherkenning, zie Figuur 18.



Figuur 18: Taxonomie van machine learning met toepassingen⁴⁶

Naast beeld- en spraakherkenning zijn dit bijvoorbeeld: fraude-detectie, toepassing van Big Data (grote hoeveelheden data), het spelen van een spel (AlphaGo), zelfrijdende voertuigen (voetgangers herkennen), vertalingen van goede kwaliteit, aanbevelingssysteem (in bijvoorbeeld Netflix, Google, Facebook), et cetera.

Deep learning (DL) is te beschouwen als een geavanceerde wijze waarop ML kan worden vormgegeven. Bij deep learning doorloopt de data een veelheid van processoren ('lagen'). Iedere processor zorgt voor een verhoging van de kans dat de invoergegevens tot een bepaalde klasse behoren, bijvoorbeeld het onderscheiden van een dier dat opgenomen is in een beeld of van een woord binnen een geluidspatroon. Door op grond van invoergegevens de classificatie steeds te verfijnen, wordt in de computer ook beter vastgelegd welke gegevens wel of niet tot een bepaalde klasse behoren. Zonder te veel in te gaan op de werking, mag gesteld worden dat DL zo ongeveer werkt zoals de neurale netwerken van een mens en de zeer vele interacties ertussen.

Aan het begin van deze inleiding is gesteld dat de computer door middel van algoritmes zelf regels opstelt maar er is niet ingegaan op deze algoritmes. Vaak zijn deze specifiek en er bestaan dan ook vele opties. Wel is het hier zinvol om de klasse van genetische algoritmen te noemen omdat deze sinds geruime tijd gangbaar en robuust gebleken is. Deze klasse heeft bovendien een begrijpelijke

⁴⁶ <https://www.freepng.fr/png-d9ik9q/>

basis in de simulatie van natuurlijke evolutie. Het algoritme is iteratief en werkt op een set gecodeerde kandidaat-oplossingen, de populatie. Een genetisch algoritme kent drie basale operatoren: selectie, kruisen en muteren voor het genereren van een nieuwe set oplossingen (de 'nakomelingen'), waarbij de minste sterke afvallen. Het proces eindigt als 'nakomelingen' niet meer sterker zijn dan hun 'ouders', d.w.z. een set oplossingen niet meer verbetert.

2.5.2 Toepassingen van ML voor draadloze communicatie

ML kan ook ingezet worden voor onderwerpen op het gebied van draadloze communicatie. Hieronder volgt een aantal voorbeelden van gebieden en concrete toepassingen.

Systeemontwerp

Diverse voorbeelden zijn denkbaar op het gebied van het ontwerpen van systemen voor draadloze communicatie met behulp van genetische algoritmen en genetisch of evolutionair programmeren⁴⁷:

- Evolutionair antenne-ontwerp, waarbij een antennestructuur net zolang wordt aangepast tot een optimale overdracht is bereikt;
- Het ontwerp van Cognitieve Radio (CR)/ Dynamic Spectrum Access (DSA). Oorspronkelijk is het CR-concept een type radio dat zich 'bewust' is van zijn omgeving en zich daardoor optimaal kan instellen voor de gewenste communicatiedienst. Ingegeven door de toenemende schaarste van radiospectrum werd dit oorspronkelijk brede concept echter al spoedig toegespitst op het opportunistisch alloceren van spectrum door radio's (ofwel DSA) om daarmee de efficiëntie van het gebruik van spectrum te verhogen;
- Bepaling van phased array multi-beam optimalisatie. Dit vindt toepassing binnen satellietcommunicatie en is ook bruikbaar voor de bepaling van beams in 5G ten behoeve van mMIMO (zie Paragraaf 2.3);
- Het verhogen van de overleefbaarheid van militaire draadloze netwerken. Een voorbeeld hiervan is ML-gebaseerde spread spectrum⁴⁸, waardoor een militair communicatiesignaal minder voorspelbaar wordt zodat het moeilijker door een vijand te detecteren en opzettelijk is te storen, c.q. *jammen*.

Modulatie

Het herkennen van objecten en patronen via ML vindt toepassing op het gebied draadloze communicatie door het herkennen van modulaties. Modulatie is het aanpassen van de uiteindelijk te verzenden analoge signalen aan de karakteristieken van de radioweg zodat de informatiesignalen draadloos overgezonden kan worden. Hiervoor is het nodig het informatiesignaal naar een radiofrequentie of carrier te brengen en waarbij bovendien de karakteristieken van dit radiosignaal naar gelang de informatiesignalen worden gevarieerd ofwel gemoduleerd. Dit kan door variatie aan te brengen in frequentie, sterkte en fase of een combinatie van deze drie grootheden. Hierdoor verandert het radiospectrum rond de carrier voor de duur van de transmissie. Er zijn meerdere succesvolle voorbeelden⁴⁹ waarbij het door deep learning mogelijk werd om vanuit het spectrumbeeld de modulatiemethoden vast te stellen. Dit kan worden gebruikt om

⁴⁷ MILCOM 2017 tutorial *Intelligent Learning Algorithms and their Application to Communications and Networking* (Johns Hopkins Applied Physics Laboratory), sheet 41

⁴⁸ I. Shakeel: *Machine Learning Based Featureless Signalling*, MILCOM 2018 pp. 382-388, Los Angeles, Oktober 2018

⁴⁹ R. El-Khoribi et al, 2014

het gebruik van spectrum door bepaalde systemen in beeld te brengen. In het verlengde van deze toepassing kan bijvoorbeeld ook bepaald worden wat de interferentie is van systemen in de ISM ongelicenseerde banden⁵⁰.

Codering

Op het gebied van codering van digitale informatie die overgezonden wordt kan Deep learning goed worden toegepast. Een zender-kanaal-ontvanger model wordt als uitgangspunt genomen voor een drie-laags neurale netwerk dat in (near) real time als *autoencoder* opereert. Het basisidee is dat deze autoencoder *deep unsupervised learning* toepast voor gezamenlijke optimalisatie van codering, decoding en signaalrepresentatie over een verslechterd communicatiekanaal. Analytische beschrijving hiervan is extreem moeilijk en zou veel rekencomplexiteit met zich meebrengen. Een deep learning-benadering is minder rekenintensief. Ruwweg gezegd, wordt elk te verzenden signaal geflankeerd door een aantal andersoortige waarna de ontvanger een beslissing kan maken uitsluitend op grond van de output (en niet met voorkennis), van wat het eigenlijke zendsignaal was⁵¹. Het resultaat was even goed als de meest optimale modulatie en coderingmethodes. Al spoedig werd dit concept uitgebreid voor MIMO-systemen⁵². Een andere vorm van codering voor draadloze communicatie is het ontwerp van een interleaver waarbij het doel is om de volgorde van de uit te zenden bits optimaal aan te passen aan het radiokanaal zodat 'bursts' van fouten kunnen worden voorkomen. Geprobeerd werd een (turbo)codering geïnspireerd op het gedrag van een mierenkolonie. Er bleken echter problemen rond de configuratie van de genetische algoritmen. Bovendien ontstonden voor lange interleavers performanceproblemen: het duurde te lang voordat het configureerde. Dit idee is dan ook nog niet door de industrie overgenomen en een oplossing voor deze problematiek zal nog wel de nodige jaren vergen.

Dynamische spectrumtoegang

Zoals aan het begin van deze paragraaf al opgemerkt, binnen draadloze communicatie deep learning toepassing op het gebied van dynamische spectrumtoegang ofwel DSA^{53,54}. Dit betreft in beide onderzoeken een vorm van deep reinforcement learning waarbij vanuit een centraal punt wordt 'geleerd' rond de spectrumbezetting in de tijd om zo goed mogelijk te kunnen voorspellen waar en voor hoelang kanalen vrij zullen komen voor gebruik.

Self-Optimising Networks

In recente jaren is ook weer toenemende aandacht voor Self-Optimising Networks (SONs), waarbij ML ingezet zou kunnen worden voor optimale geautomatiseerde netwerkbesturing en -dienstlevering van vooral cellulaire netwerken zoals LTE en vooral 5G. SON zal verder specifiek in de volgende paragraaf ter sprake komen.

⁵⁰ M. Schmidt, D. Block & U. Meier: *Wireless Interference Identification with Convolutional Neural Networks*, maart 2017

⁵¹ T. O'Shea & J. Hoydis: *An introduction to Deep Learning for the Physical Layer*, juli 2017

⁵² T. O'Shea, T. Erpek & T. Clancy: *Deep Learning-based MIMO Communications*, juli 2017

⁵³ O. Naparstek & K. Cohen: *Deep Multi-user Reinforcement Learning in Dynamic Spectrum Access in Multi-channel Wireless Networks*, april 2017

⁵⁴ Y. Xu, J. Yu, W.C. Headley, R.M. Buehrer: *Deep Reinforcement Learning for Dynamic Spectrum Access in Wireless Networks*, MILCOM 2018 pp. 58-63, Los Angeles, Oktober 2018

2.5.3 De toekomst

In zijn algemeenheid is te verwachten dat ML al binnenkort in versnelde mate toegepast zal gaan worden, bijvoorbeeld op de gebieden van e-commerce, entertainment (vooral gaming), zorg en transport⁵⁵. De ontwikkeling en toepassing van ML blijkt de laatste jaren een vlucht te hebben genomen: in 2018 maakten bedrijven al twee maal zoveel gebruik van ML dan in 2017⁵⁶. Bovendien studeren steeds meer academici af in een onderwerp omtrent data science, zoals big data, data analyses en machine learning. Verwacht mag dan ook worden dat veel specifieke toepassingen zullen worden geïdentificeerd die ons leven makkelijker en veiliger kunnen maken. Het gebied van draadloze communicatie is daarbij als *enabler* voor ML van groot belang, aangezien door IoT steeds meer gegevens (*Big Data*) gegenereerd en uitgewisseld zullen worden. Dit zal door de bovenstaande toepassingsgebieden van ML de economie en samenleving gaan beïnvloeden. Een specifiek technisch innovatiegebied van ML is het combineren van genetische algoritmen om neurale netwerken beter, sneller en efficiënter te maken, dit terwijl de verwachte toenemende computerkracht sowieso nog meer mogelijk kan maken. Uiteraard zijn aan de opkomst van almaar slimmer wordende computers om ons heen ook nadelen verbonden: wat kunnen en willen we echt aan computers overlaten en wat niet. Zo beschikken computers niet over bepaalde menselijke eigenschappen zoals empathie, intuïtie en een ethisch bewustzijn. Daarbij komt ook het vraagstuk waar de toenemende autonomie van computers uiteindelijk toe zal leiden: zo is een krachtige maar discutabele technologie die van generatief *programmeren*: het bijstellen van de algoritmen, c.q. programma's, door de computer zelf.

Voor wat betreft de invloed van ML op draadloze communicatie is er het potentiële voordeel voor operators en daardoor op termijn voor consumenten en andere gebruikersgroepen van aanzienlijke kostenbesparing door geautomatiseerd netwerkbesturing en -dienstlevering omdat veranderingen in het netwerk automatisch worden opgevangen. ML voor de ontwikkeling van SON binnen specifiek 4G en met name 5G wordt dan ook intensief onderzocht. Hier stuit men echter buiten de nodige fundamentele architectuur- en standaardisatievraagstukken op het feit dat de grote volumina data die voor de operationele SON-functies zijn benodigd, bij het vele gebruikersverkeer komt⁵⁷. Omdat veel van de SON-data niet zinvol zal zijn, wordt verwacht dat dit operators niet zal aanmoedigen ML toe te passen. Om onder meer uit deze impasse te komen vindt momenteel onderzoek plaats.⁵⁸

De toepassing van ML voor DSA gaat relevanter worden voor een efficiënter gebruik van met name de schaarse conventionele frequentiebanden (beneden 6 GHz). Daarom mag verwacht worden dat dit nog intensiever zal worden onderzocht zodat bijvoorbeeld 5G met voldoende capaciteit in de 700 MHz en 3,5 GHz-banden kan worden verwezenlijkt om de gebruiker in rurale gebieden de juiste 5G *experience* te bieden.

⁵⁵ <https://3bplus.nl/infographic-machine-learning-is-leren-door-ervaring/>

⁵⁶ DeLoitte

⁵⁷ J. Moysen & L. Giupponi: *From 4G to 5G: Self-organized Network Management meets Machine Learning*, Computer Communications, July 2017

⁵⁸ R. Amiri et al: *Reinforcement Learning for Self-Organization and Power Control of Two-Tier Heterogeneous Networks*, maart 2019

In de visie van bijvoorbeeld GSMA⁵⁹ leidt de wisselwerking van 5G en ML (5G als enabler voor ML en andersom) tot alom beschikbare zogenaamde *intelligent connectivity* die aanzienlijk effect zal hebben op alle mogelijke sectoren zoals industrie, transport, gezondheidszorg, omgeving en milieu en educatie in termen van beleving, veiligheid en bovenal efficiëntie.

⁵⁹ www.gsma.com/IC/wp-content/uploads/2019/02/22209-Intelligent-connectivity-report.pdf

3 Tot besluit

Voor eventuele vragen of opmerkingen naar aanleiding van deze Monitor Draadloze Technologie kunt u contact opnemen met TNO, via e-mail adres monitordraadlozetechnologie@tno.nl.

Graag wijzen wij u op de mogelijkheid om deze Monitor Draadloze Technologie, of delen daarvan, door TNO te laten presenteren voor doelgroepen binnen de Nederlandse telecommunicatiesector. Voor verdere informatie hierover verzoeken wij u contact op te nemen via bovengenoemd e-mail adres, of met één van de auteurs van dit rapport.